

## 공간자료와 지면모형을 이용한 면적증발산 추정

윤진일<sup>1</sup> · 남재철<sup>2</sup> · 홍석영<sup>3</sup> · 김 준<sup>4</sup> · 김광수<sup>5</sup> · 정유란<sup>1</sup> · 채남이<sup>4</sup> · 최태진<sup>4</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 생태시스템공학과, <sup>2</sup>기상연구소 응용기상연구실,  
<sup>3</sup>농업과학기술원 토양관리과, <sup>4</sup>연세대학교 대기과학과, <sup>5</sup>아이오와주립대 식물병리학과  
(2004년 6월 23일 접수; 2004년 7월 28일 수락)

## Using Spatial Data and Land Surface Modeling to Monitor Evapotranspiration across Geographic Areas in South Korea

J. I. Yun<sup>1</sup>, J. C. Nam<sup>2</sup>, S. Y. Hong<sup>3</sup>, J. Kim<sup>4</sup>, K. S. Kim<sup>5</sup>, U. Chung<sup>1</sup>, N. Y. Chae<sup>4</sup> and T. J. Choi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Ecosystem Engineering, Kyung Hee University, Suwon, Korea

<sup>2</sup>Applied Meteorology Lab., Meteorological Research Institute, Seoul, Korea

<sup>3</sup>Soils Division, National Institute of Agricultural Science and Technology, Suwon, Korea

<sup>4</sup>Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

<sup>5</sup>Department of Plant Pathology, Iowa State University, Ames, Iowa, USA

(Received June 23, 2004; Accepted July 28, 2004)

### ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) is a critical component of the hydrologic cycle which influences economic activities as well as the natural ecosystem. While there have been numerous studies on ET estimation for homogeneous areas using point measurements of meteorological variables, monitoring of spatial ET has not been possible at landscape - or watershed - scales. We propose a site-specific application of the land surface model, which is enabled by spatially interpolated input data at the desired resolution. Gyeonggi Province of South Korea was divided into a regular grid of 10 million cells with 30m spacing and hourly temperature, humidity, wind, precipitation and solar irradiance were estimated for each grid cell by spatial interpolation of synoptic weather data. Topoclimatology models were used to accommodate effects of topography in a spatial interpolation procedure, including cold air drainage on nocturnal temperature and solar irradiance on daytime temperature. Satellite remote sensing data were used to classify the vegetation type of each grid cell, and corresponding spatial attributes including soil texture, canopy structure, and phenological features were identified. All data were fed into a standalone version of SiB2(Simple Biosphere Model 2) to simulate latent heat flux at each grid cell. A computer program was written for data management in the cell - based SiB2 operation such as extracting input data for SiB2 from grid matrices and recombining the output data back to the grid format. ET estimates at selected grid cells were validated against the actual measurement of latent heat fluxes by eddy covariance measurement. We applied this system to obtain the spatial ET of the study area on a continuous basis for the 2001-2003 period. The results showed a strong feasibility of using spatial - data driven land surface models for operational monitoring of regional ET.

**Key words** : Evapotranspiration, GIS, SiB2, Land surface model, Eddy covariance

### I. 서 언

지구환경 변화에 따른 가뭄, 장마, 홍수 등 수자원의

변동은 자연생태계 뿐 아니라 국가경제와 시민생활에도 심각한 영향을 줄 것으로 우려된다. 물과 에너지의 순환에 있어서 가장 중요한 성분이 바로 증발산이다.

증발산에 대한 정확한 정보는 일기예보나 기후전망의 신뢰도를 개선하는데 기여할 뿐 아니라, 농업업을 비롯한 육상생태계 관리의 주요한 의사지원수단으로 활용될 수 있다. 따라서 선진국에서는 오래 전부터 장기적이고 종합적인 연구를 통해 증발산량 산정기술을 축적해 왔다(Penman, 1948; Monteith, 1965).

우리나라처럼 지형과 지표피복이 복잡다양한 곳에서 실제증발산의 변이를 거의 실시간으로 파악하고 지속적으로 감시할 수 있는 방법은 무엇인가. 에다공분산 장비 등을 이용한 미기상학적 방법은 관측지점 주변 지역의 공간평균적인 증발산을 직접 측정할 수 있는 좋은 방법이지만 하나 정점관측이기 때문에 조밀한 관측망이 구성되기 전에는 증발산의 공간변이를 알 수 없다. 고가의 장비, 운영경비, 그리고 숙련된 전문인력 등 현실적인 문제 때문에 조밀한 관측망을 구성하기는 어려우므로 넓은 지역의 증발산분포를 파악하기에는 부적합하다. 이를 타개하기 위한 방법으로서 Ogunjemiyo *et al.*(2003)은 캐나다의 BOREAS 지역에서 저고도 항공기로 측정한 flux footprint 내 지표 피복정보(수종, 작물)를 Landsat TM으로부터 얻어 이들 상호관계를 회귀식으로 표현하여  $r^2 = 0.9$ 를 얻었다. 복잡한 지표면 상의 flux 추정에 경계층 모형이 별로 기여하지 못함에 따라 이런 간단한 방법으로 피복종류에 따른 오차를 감소시키려 한 것이다. 이처럼 증발산의 공간변이는 직접 측정보다는 증발산과 밀접한 관련이 있는 기상-식생변수들을 이용하여 간접적으로 추정하는 것이 더욱 현실적이다. 증발산 관련 변수들 가운데 실시간에 가깝게 얻을 수 있는 것은 지상기상자료(1분 - 1시간)와 정지기상위성의 구름사진(30분 - 1시간) 뿐이므로, 면적(areal, spatial, regional) 증발산을 추정하는 방법은 이들 두 종류의 정보를 중심으로 연구되어 왔다.

우선 위성원격탐사자료를 이용하는 방법으로서 해상도는 낮지만 거의 실시간 감사가 가능한 정지기상위성 혹은 하루 한번 이상으로 재방문주기가 양호한 극궤도 위성을 기반으로 하되, 해상도는 높지만 재방문주기가 긴 위성자료(Landsat, IKONOS 등)에 의해 보완하는 것이 가장 보편적이다. 이 방법은 특히 증발산정보의 현장성과 지속성이 필요한 분야에서 집중적인 조명을 받고 있다(Sequin *et al.*, 1991; Moran *et al.*, 1996; Mecikalski *et al.*, 1999; Chae, 2001; French *et al.*, 2002; Kustas *et al.*, 2003; Ogunjemiyo *et al.*, 2003).

시간 혹은 일간 기상자료를 이용하는 방법은 지표-대기 접합모형(지면모형)을 활용하는 것이다. 원래 하나의 시험지 혹은 포장에 적용하기 위해 개발된 SVAT(soil-vegetation-atmosphere transfer) 혹은 land surface 모형을 경관조각(landscape patch)이나 격자점(grid cell) 단위로 준비된 입력자료에 의해 구동시키면 공간변이를 파악할 수 있다. SVAT모형은 검증된 생지구물리 및 생지구화학과정으로 구성되며, 관측된 기상자료 역시 신뢰할 수 있으므로 계산된 증발산의 신뢰도는 매우 높다고 알려져 있다(Cho and Kim, 2003). SVAT 모형 외에도 Penman-Monteith 방정식에서 기준증발산을 얻은 다음, 식생 종류 및 생육단계에 따라 소위 "작물계수"를 적용하여 실제증발산을 추정하는 방법도 널리 이용되고 있다(Allen *et al.*, 1998).

그러나 실제에 있어서는 두 방법 혹은 정보를 혼용하여 실용성을 높이는 경우가 많다. 예를 들어 지면모형 구동에 필요한 격자형 입력자료(grided input data)를 원격탐사자료로부터 생성하거나, SVAT모형 계산값의 보정을 위해 원격탐사자료를 활용하는 것이다. Mo *et al.*(2004)은 경기도 면적 규모의 중국 Lushi 분지 증발산을 매 시간별 기상자료(일 최고최저기온의 시간내삽에 의해 산출)에 근거한 지면모형 SiB2(Simple Biosphere Model, Version 2)에 의해 1km 공간해상도로 모의하였다. 지면모형에서 요구하는 수증기 전도도는 위성영상으로부터 식생지수를 계산하고 이로부터 추정된 엽면적지수를 이용하여 얻었다. 한편 Naoum and Tsanis(2003)는 남한면적의 1/10 정도인 그리스 크레타섬을 대상으로 30m 해상도의 수치고도 모형(Digital Elevation Model, DEM)과 54개 기상관측소의 일 기상자료를 이용하여 일간 기준증발산(potential evapotranspiration)을 계산하는 소프트웨어를 제작하였다. 기상자료는 GIS 패키지에 내장된 공간통계기법(IDW, spline, Kriging, trend analysis 등)을 이용해 내삽하였고, 이를 FAO PM 방정식에 입력시켜 기준증발산을 구했지만, 지표피복분류 및 피복별 식생지수 관련정보는 활용하지 않았다.

본 연구에서는 Naoum and Tsanis(2003) 수준의 공간해상도에서 Mo *et al.*(2004)이 사용한 지면모형 수준의 실제증발산을 추정하고 계산결과의 신뢰성을 평가할 수 있는 실측증발산자료를 확보하고자 하였다. 이를 위해 일사량과 기온분포를 30m 공간해상도에서 중관기상자료와 정밀한 소기후모형에 의해 추정하였고,

대표적인 지표피복에 대하여 에디공분산법에 의한 장기간의 증발산실측을 통해 계산결과의 신뢰성을 확보하였다. 특히 기상자료는 흔히 사용되는 일간 자료(최고, 최저, 평균, 적산 등)의 시간내삽 대신 시간별 관측자료의 직접 공간내삽을 이용하였다.

## II. 모형과 입력자료

### 2.1. SiB2

본 연구에 사용된 지면모형은 GCM(General Circulation Model)의 지면모수화를 위해 Sellers et al.(1986)이 개발한 SiB2로서, 환경변화에 따른 식물의 반응을 예측하는데도 널리 사용되어왔다. 변수 상호관계를 인정하며 광합성 - 전도도 모형과 PM 복합방정식의 연동에 의해 이산화탄소와 수증기간 연결 관계를 수치적으로 모사한다는 점에서 다른 지면모형과 차별화 된다. 원래는 GCM과의 연동을 목적으로 하나, 농업생태계 연구분야의 경우 오히려 관측된 대기환경조건(기온, 습도, 바람, 일사 등)에서 자립판(standalone version)을 구동시키는 방법으로 널리 이용되어 왔다.

이 모형에서 대기 - 식생 간 이산화탄소 교환, 즉 한 개 잎의 광합성과정은 3가지 측면에서 정량화되어 있다. 첫째, 생화학적 측면에서 광합성속도는 RuBP carboxylase - oxygenase의 활성화에 의해 조절되며, 둘째, 광화학적 관점에서 광합성속도는 여기전자(excited electron)의 가용성에 의해 제한되고, 셋째, 대기 중 이산화탄소의 잎 내부로의 확산 측면에서 기공전도도 개념이 정량적으로 표현되어있다.

식생 - 대기 간 수증기 교환은 에너지 배분과 생물학적, 공기역학적 및 기후학적 조절인자에 의해 결정된다. 이러한 조절인자 상호관계를 열과 수증기의 복합방정식 형태로 표현하여 증발산을 진단 예측하고자 하는 방법이 Penman(1948)에 의해 처음 제시되었으나, 자유수면 혹은 젖은 표면처럼 수증기의 확산경로에 저항이 전혀 없는 경우에만 적용가능 하였다. 이후 Penman의 복합방정식에 Monteith(1965)가 수증기 플럭스에 대한 표면 저항의 개념을 도입함으로써 실용성이 높아진 소위 PM 복합방정식이 널리 이용되게 되었다 (식 1).

$$\lambda E = \frac{sA + C_p \rho D g_a}{s + \gamma(1 + g_d/g_c)} \quad (1)$$

여기서,  $\lambda E$ 와  $A$ 는 잠열 플럭스와 가용에너지를 나타낸다.  $s$ 와  $\gamma$ 는 각각 온도에 대한 포화증기압의 기울기와 건습계 상수이다.  $C_p$ ,  $\rho$ ,  $D$ 는 각각 정압 비열, 공기밀도, 포차이다.

식생 전도도( $g_c = 1/r_c$ , canopy conductance)는 이론상 대표적인 잎의 기공저항과 엽면경계층저항을 porometer에 의해 측정하여 균락전체 엽면적을 곱해주면 알아낼 수 있다. 하지만 실제상황에서 균락을 대표 하는 잎을 찾아내기는 어려우므로 대신 토양 - 식물 - 대기 연속체 속에서 복잡한 되먹임(feedback)으로 얽혀있는 생물리 및 생화학적 과정을 컴퓨터 프로그램에 의해 모사함으로써 추정할 수밖에 없다. 전술한대로 SiB2는 이런 면에서 탁월한 기능을 갖고 있다. 또한 에디공분산법 같은 믿을만한 방법으로 증발잠열을 직접 측정할 수 있다면 식생 전도도는 역으로 PM 복합방정식으로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$g_c = \frac{\gamma \lambda E}{(A - \lambda E)s/g_a + \rho C_p D} \quad (2)$$

식생과 고도  $Z$  사이의 공기역학 전도도( $g_a$ , aerodynamic conductance)는 다음 식으로 표현된다.

$$g_a = [(U/u_*^2) + (5/u_*)(k/D_v)^{2/3}]^{-1} \quad (3)$$

여기서  $U$ 와  $u_*$ 는 각각 평균풍속과 마찰속도이다.  $k$ 와  $D_v$ 는 각각 열과 수증기의 분자 확산계수이며,  $(k/D_v)^{2/3} = 0.925$ 로 가정한다.

SiB2는 식생균락을 하나의 커다란 잎으로 간주하여 주어진 환경 내에서 PM 복합방정식과 광합성모형이 연동되도록 설계되어있다. Fig. 1은 식생 표면과 기공 및 대기 상호간의 저항을 표현한 모식도이다. 여기서  $T_{(z)}$ 와  $e_{(z)}$ 는 일정고도 ( $Z$ )에서의 온도와 수증기압이고,  $T_{(0)}$ 와  $e_{(0)}$ 는 식생 표면에서의 온도와 수증기압을 나타낸다. 특히,  $e_{w(0)}$ 는 식생표면의 온도  $T_{(0)}$ 에서의 포화수증기압을 나타낸다.  $r_{ah}$ 와  $r_{av}$ 는 각각 현열과 잠열에 대한 공기역학저항이다. 기타 증산과 증발의 배분, 식생저항 및 공기역학저항의 모수화, 복사전달과정, 토양 수분 등 SiB2의 주요 과정에 대한 설명은 Mo et al.(2004)에 자세하게 기술되어있다.

### 2.2. 입력자료

자립판 SiB2 구동을 위해서는 Data1과 Data2라고

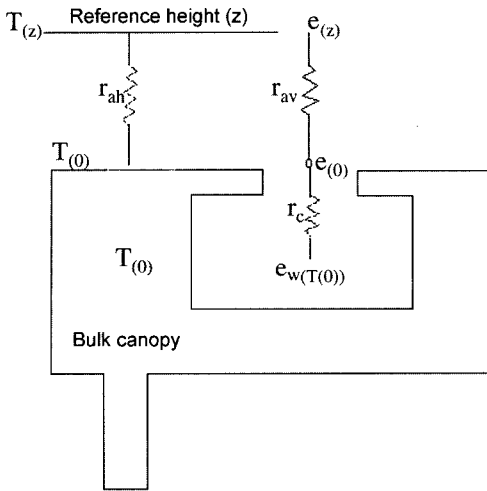


Fig. 1. Schematic of the resistance network applied to crop canopy in SiB2.

불리는 2종류의 입력 파일이 준비되어야 한다. Data1에는 적용지점의 지표피복특성으로서 비교적 장기간에 걸쳐 변화하거나 이에 시간불변인 상수들로 구성된다. 이들 시간불변성 지표특성에는 식생에 따른 군락의 형태적, 광학적, 생리적 변수들이 포함된다. 또한 토성에 따른 토양수분 및 기타 물리적 특성들이 Data1에 포함된다. Data2는 적용지점의 대기조건을 나타내며 1시간 간격으로 관측된 하향장파 및 단파, 기온, 수증기압, 풍속, 강수량 등 구동변수로 구성된다.

### 2.2.1 시간불변성 자료 (Data 1)

자립판 SiB2가 증발산 추정 목적으로 사용될 경우 당연히 그 지역의 지표특성이 매우 중요하다. 특히 넓은 지역에 걸쳐 증발산의 공간변이를 보고자 한다면 지표특성의 공간변이부터 먼저 준비되어야 하므로 위성 원격탐사자료를 직접 활용할 수 있도록 배려하고 있는 점도 SiB2의 장점 중 하나이다. 즉 근적외선과 가시광선 파장대의 지표 반사율 차이를 이용하여 얻은 식생지수(vegetation index)가 엽면적지수 등으로 변환되어 모형 입력자료로 직접 이용된다.

가시영역과 근적외선영역의 반사율을 각각  $a_v$  및  $a_N$ 이라 하면 식생지수 가운데  $SR = a_N/a_v$ ,  $NDVI = (a_N - a_v)/(a_N + a_v)$ 로 계산되며, 이들을 SiB2가 요구하는 광합성유효복사 흡수율(FPAR), 엽면적지수(LAI), 군락녹색도(canopy greenness index) 등으로 변환하는 과정은 다음과 같다(Sellers *et al.*, 1996).

$$FPAR = \frac{(SR - SR_{i,\min})(FPAR_{\max} - FPAR_{\min})}{(SR_{i,\max} - SR_{i,\min})} + FPAR_{\min} \quad (4)$$

여기서  $FPAR_{\max}$ 와  $FPAR_{\min}$ 은 식생종류에 상관없이 결정되며,

$$SR_{i,\max} = \frac{1 + NDVI_{i,98}}{1 - NDVI_{i,98}},$$

$$SR_{i,\min} = \frac{1 + NDVI_{i,5}}{1 - NDVI_{i,5}} \text{ 이다.}$$

식생의 엽면적지수는 균일하게 분포된 식생, 군집된 식생, 혼합 식생에 대해 각각

$$L_g = L_{g,i,\max} \frac{\log(1 - FPAR)}{\log(1 - FPAR_{\max})} \quad (5)$$

$$L_g = \frac{L_{g,i,\max} FPAR}{FPAR_{\max}} \quad (6)$$

$$L_g = (1 - F_{cl}) L_{g,i,\max} \frac{\log(1 - FPAR)}{\log(1 - FPAR_{\max})} + F_{cl} \frac{L_{g,i,\max} FPAR}{FPAR_{\max}} \quad (7)$$

이다.

### 2.2.2. 시간의존성 자료 (Data2)

SiB2를 지역단위로 적용하기 위해서는 지역 내 기상관측밀도를 원하는 공간해상도로 높이거나 한정된 관측자료로부터 임의의 미관측지점의 기상자료를 추정해 내야 한다. 본 연구에서는 여러 지점의 표준기상관측소에서 생산하는 시간별 종관기상자료를 지형기후모형에 입력시켜 공간적으로 내삽하는 방법을 통해 각 격자점의 입력자료를 생성하였다.

#### 2.2.2.1. 하향 단파복사

경사지의 일사 수광량은 시간에 따른 태양고도 및 방위각의 변화가 수광면의 기하학적 형태와 반응하여 평지와는 크게 다른 양상을 보인다. 흔히 사용되는 경사면의 일사 수광량 계산방법은 수평면 전천일사량을 대상으로 하지만, 수평면 전천일사량에는 직달일사, 산란일사, 그리고 주변으로부터의 반사성분이 섞여 있으므로 지형에 따른 정확한 일사 수광량을 계산하기 위해서는 전천일사량을 이들 성분별로 분류하고, 각 성분별로 적합한 계산식이 만들어져야 한다. 엄밀하게는

기존의 계산방법이 적용될 수 있는 성분은 직달일사 하나에 한정된다고 할 수 있다. 기존의 방법이 갖는 또 하나의 취약점은 주변 지형에 의한 직달일사 성분의 차단효과를 반영할 수 없다는 것이다. 복잡한 산악 지형에서는 주변 지형이 만드는 그늘에 의해 직달일사 성분이 차단되어 실제 수광량이 계산값보다 적은 경우가 생길 수 있다. 따라서 정밀한 태양위치와 지형 간 기하학적 관계를 토대로 그늘진 지역의 수광량을 보정할 수 있는 방법도 강구되어야 한다. 본 연구에서는 Chung and Yun(2004)의 방법에 의해 사면의 시간대별 하향단파복사를 추정하였다.

이 방법에서 우선 지표면에 도달하는 일사량은 대기 외일사량(태양상수의 한 시간 적산값,  $S_0$ )으로부터 추정하였는데, 이 때 관측지점의 태양고도( $\alpha$ )에 따라 직달성분( $S_{b0}$ ) 및 산란성분( $S_{d0}$ )으로 구분하였다.

$$S_{b0} = S_0 \tau^{\frac{1}{\sin \alpha}} \sin \alpha \quad (8)$$

$$S_{d0} = S_0 \left( 0.271 - 0.294 \tau^{\frac{1}{\sin \alpha}} \right) \sin \alpha \quad (9)$$

여기서  $\tau$ 는 태양복사의 대기 투과율 상한값으로서 대기권 최외곽에 도달한 복사에너지 가운데 약 80%까지 산란되지 않고 직접 지구표면에 도달한다고 가정하여 0.8로 두었다. 대기 투과율은 태양고도가 낮아짐에 따라 함께 낮아져 직달일사 성분을 감소시킨다.

관측지점의 태양방위각이  $\beta$ 일 때 경사향이  $b$ 이고 경사도가  $a$ 인 지면이 받는 직달일사량은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{b1} = S_{b0} \frac{\{\cos \alpha \cos(\beta - b) \sin \alpha + \sin \alpha \cos \alpha\}}{\sin \alpha} \quad (10)$$

그러나 주변지형에 의해 생기는 그늘이 이 시간대와 겹친다면 이 값은 당연히 0이 된다. 그늘이 생기는지 여부는 일반 GIS 기능 가운데 “Hill Shade” 함수를 이용하면 쉽게 계산된다.

산란일사는 광학적 등방성이 적용될 수 있으므로, 수광량은 수광면의 각도에 무관하며 천공의 개방도에만 의존한다. 따라서 경사면의 산란일사 수광량은

$$S_{d1} = S_{d0} \cos^2 \left( \frac{a}{2} \right) \quad (11)$$

로 표현된다. 여기서  $\cos^2 \left( \frac{a}{2} \right)$ 는 1을 최대값으로

하는 천공개방도를 가리킨다.

두 가지 성분을 합치면 각각 수평면과 경사면이 받는 시간대별 일사량을 구할 수 있으며, 일 적산일사량은 시간대별 일사량을 합치면 된다.

### 2.2.2.2. 낮 시간대 기온의 추정

기단, 해발고도 등 종관기상 조건이 동일한 지역에서 지점간 나타나는 국지기온의 차이는 주어진 순복사 에너지의 소모요인 가운데 현열의 크기에 의해 설명할 수 있다. 하지만 일사 수광량 가운데 어떤 비열만큼 현열로 소모되는지, 혹은 관측된 기온편차 중 과연 얼마가 수광량의 차이에 기인한 것인지 알기 위해서는 보다 정밀한 미기상학적 관측이 선행되어야 한다. 더욱이 실용성을 염두에 둔 연구라면 현실세계에서 예상되는 모든 대기 및 지표조건에서 시공간적으로 방대한 실험을 수행해야 할 것이다. 이것은 현실적으로 불가능한 일이므로 본 연구에서는 대기 및 지표조건이 유사한 두 지점에서 기온과 일사 수광량을 시간대별로 측정해서 수광량의 차와 기온의 차 사이에 얻어지는 경험식을 이용하고자 하였다.

Chung and Yun(2004)에 따르면 비관측점의 거리가 중역산(inverse distance weighting, IDW) 내삽오차는 주로 관측점과의 고도편차 및 지형의 이질성, 두 가지 원인에 의해 생긴다. 관측점의 표고값만으로 복원한 가상지형으로부터 비관측점의 표고차를 얻어 여기에 기온감율을 적용하면 첫 번째 오차의 크기를 추정할 수 있다. 지형의 이질성은 바로 일사 수광량 차이를 유발하며 평지 관측점에 대한 경사지 비관측점의 현열 차이로 연결된다. 만약 일사량 차이를 기온의 차이로 변환할 수 있는 경험계수가 주어진다면 거리자승역산가중법(inverse distance squared weighting, IDSW)을 토대로 임의 비관측점의 기온내삽 오차를 정량적으로 표현할 수 있다.

$$T - \frac{\sum \frac{T_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} = \left[ z - \frac{\sum \frac{z_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \right] \Gamma + \left[ S - \frac{\sum \frac{S_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \right] \Delta + \varepsilon \quad (12)$$

여기서  $T_i$ 는 지점 ‘ $i$ ’의 실측 기온,  $d_i$ 는 내삽지점으로부터 관측점 ‘ $i$ ’까지의 거리,  $z$  및  $z_i$ 는 각각 내삽지점과 관측점 ‘ $i$ ’의 해발고도,  $\Gamma$ 는 해발고도에 따른 기온감율,  $S$ 는 내삽지점의 경사도와 경사방위를 고려해 계산된 일사 수광량,  $S_i$ 는 관측점 ‘ $i$ ’의 실측 일사량,

그리고  $\Delta$ 는 일사에너지의 기온당량, 즉 수평면과의 일사 수광량 차이를 기온변화량으로 변환하기 위한 계수이다. 고도와 지형인자만으로는 해석할 수 없는 나머지 오차가  $\epsilon$ 이다.

식(12)의 좌변 두 번째 항은 IDSW내삽에 의한 추정기온이며, 우변 첫 항의 괄호 안은 IDSW 내삽으로 복원한 '가상지형'과 실제 표고간 편차를 의미한다. 따라서 우변 첫 항은 해발고도의 국지적 변이로부터 생기는 오차를 나타내며, 표고차 보정에 이용될 수 있다. 두 번째 항의 괄호 안에 있는 계산식은 표준관측지점 또는 수평면 천천일사량에 대한 경사면의 일사 수광량 차이를 나타낸다. 이류가 없는 조건이라면 지상 1.5m 높이에서 시간대별로 관측되는 기온값은 지표로부터 관측위치에 이르는 현열의 크기에 의해 결정되며, 다른 조건이 모두 같다면 지표 순복사에너지와 밀접한 관련이 있다. 낮시간대의 순복사에너지 경시변화는 거의 일사 수광량의 변화를 따르므로, 일사 수광량은 낮 시간 동안의 기온을 결정하는 매우 중요한 인자가 된다. 따라서 지형에 따른 일사 수광량 분포를 정확히 계산하고, 일사 수광량의 공간변이를 기온의 변이로 표현할 수 있는 적절한 변환계수를 찾아낸다면, 이 항은 지형의 복잡성에 기인한 오차를 보정하는 데 이용될 수 있다.

Chung and Yun(2004)에 의하면 지표피복이 초지인 경우 제주도에서 관측된 일사기온당량  $\Delta$ 는 겨울 1.6, 여름 1.8, 봄 1.9°C/MJm<sup>-2</sup>로서 계절에 따라 약간의 변화를 보인다. 즉 제주도 초지의 경우 기준점에 비해 한 시간 동안 1m<sup>2</sup> 당 일사 수광량이 1 MJ 증가함에 따라 기온은 기준점보다 1.6 - 1.9°C 상승한다는 의미이다. 강원도 평창의 벼논에서 관측된  $\Delta$ 는 겨울에 2.5 - 3.0, 여름에 1.3 - 1.6°C/MJm<sup>-2</sup>로서 계절별로 뚜렷이 다른 값을 보인다. 즉 겨울철에는 제주도의 초지에 비해 거의 두 배 가까운 값을 보였고, 여름에는 초지에 비해 작은 값을 보였다. 밭의 경우 경북 봉화의 과수원지대에서 얻은 값이 겨울에 2.5 - 2.9, 여름에 0.9 - 1.5, 그리고 봄가을에는 1.3 - 2.2°C/MJm<sup>-2</sup> 범위에 들었다. 본 연구에서는 벼논, 밭, 초지의 경우 Chung and Yun(2004)의 값을 수정 없이 사용하였고, 삼림의 경우 활엽수림은 과수원에서 얻은 값을, 침엽수림은 초지에서 얻은 값을 준용하였다.

2.2.2.3. 야간의 매시기온 추정

만약 야간복사냉각을 무시할 수 있는 기상조건(예,

구름이 많이 끼거나 강풍이 부는 날)이거나 세밀한 지형효과를 무시할 수 있는 공간규모(예, 1km 이상 공간해상도의 남한 전역)라면 식 (12)의 우변 첫째 항까지만 이용하여도 좋은 결과를 얻을 수 있다. 하지만 고기압권에 들어서 바람이 약하고 구름이 적은 조건에서는 야간기온 추정시 미세한 지형특성의 차이를 고려해야 한다. Fig. 2는 이런 조건하에 기대되는 최저기온의 연직구조를 표현한 것이다. 직선 A는 표준대기의 일 최저기온 연직구조로서 건조단열감율을 따른다. 기상청 정규관측소, 예를 들어 광릉수목원에서 가장 가까운 동두천기상대에서 관측되는 일 최저기온은 관측소 대기 자체의 복사냉각에 의해 이보다 낮아지고 따라서 연직구조는 B로 변형될 것이다. 정규기상관측소는 관측여건이 좋은 곳에 위치하므로 주변으로부터 찬 공기가 유입되거나 축적되는 일은 거의 없다. 하지만 산간지대에서는 지형적인 영향 때문에 계곡에는 찬 공기가 축적될 것이고 산 중턱에는 소위 "온난대"가 형성되므로 기온 연직구조는 D를 닮을 것이다. 만약 주변 정규관측소 자료를 기존의 고도보정 공간내삽과정을 거쳐 농경지나 삼림의 기온으로 변환한다면 D 대신 C를 이용하게 되므로 고도 Z1을 기준으로 아래쪽은 과다추정, 위쪽은 과소추정 경향이 나타난다. 즉 기존 방법에 의한 일 최저기온 추정값은 위치에 따라

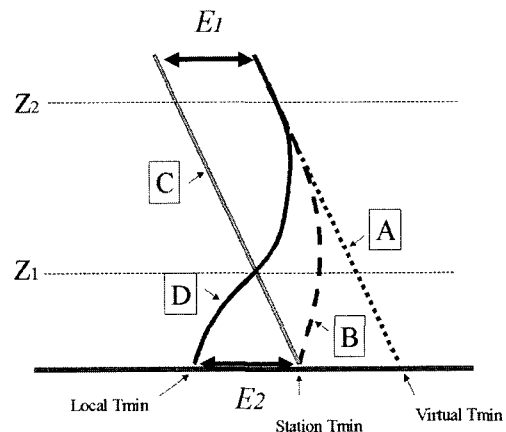


Fig. 2. Hypothetical profiles of minimum temperatures caused by nocturnal radiative cooling. The profile "A" is that of the standard atmosphere. The curved line "B" is the profile over a surface synoptic station, which are free from cold air inflow from the surroundings. The conventional elevation-effect correction follows the profile "C". The profile "D" is the observed profile in complex terrain. The so-called thermal belt starts from Z1 and to end at Z2 (inversion cap).

E1 및 E2만큼 보정해야 한다. Chung et al.(2002)은 GIS의 수문함수인 Flow Accumulation을 사용하되, 현지실측에 의해 어떤 격자점의 냉기 유입량 추정값과 관측된 최저기온간 관계, 정확하게는 기존모형에 의해 해석되지 않는 추정오차와의 관계를 도출하였다. 냉기 유입량의 계산과정은, 대상지역의 지형특성을 30m 해상도의 수치고도모형으로 표현하고, 냉기의 흐름방향을 인접한 8개 격자점과의 최대 고도편차로부터 계산하며, 흐름방향으로부터 판정되는 유입격자점의 수를 적산하는 것으로 이루어진다. 이 방법에서 미관측지점의 최저기온 추정값은 IDW에 의한 추정값에 정의 온난대효과와 부의 냉기집적효과가 더해진 것으로서 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$T_{\min} = T_{idw} + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (13)$$

테더존데 등 특수장비를 이용한 야간 경계층 기온연직구조 관측에 의하면 온난대효과는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_1 = \Delta T_{\max} [1 - \exp\{-0.03 \cdot (Z - 200)\}] \quad (14)$$

여기서 온난대효과에 의한 온도상승분의 최대값은 4°C로서 당일의 기온 일교차의 상대비율에 직선적으로 비례한다고 가정한다.

$$\Delta T_{\max} = R \cdot \left( \frac{1}{R_{\max}} \right) \cdot 4$$

여기서 R은 일교차, R<sub>max</sub>는 일교차의 최대값으로서 18°C로 두었다.

냉기집적에 의한 기온하강분은 주변 1ha 정도의 면적에서 유입되는 찬 공기 축적량(CA)의 상용대수에 비례하며, 역시 기온 일교차의 상대비율을 비례상수로 갖는다(Chung et al., 2003).

$$\varepsilon_2 = R \cdot \left( \frac{1}{R_{\max}} \right) \cdot \log_{10}(CA) \quad (15)$$

그러나 위에서 계산된 보정값들은 일 최저기온에 적용되는 상한값이므로, 일몰 후 임의시간의 실제 냉기 침강 및 온난대 효과는 일몰 후 시간경과에 따라 로그함수적으로 증가하여 일출 직전에 최대값에 도달하는 것으로 상정하였다.

#### 2.2.2.4 기타 기상요소의 추정

강수량, 풍속, 수증기압 등은 Mo et al.(2004)이 제시한대로 다음 경험식에 의해 추정하였다. 수증기압은 기상지형과 실제지형 간 표고차(h, 단위 m)를 이용하여

$$e_h = e \exp\left(\frac{-h}{6,300}\right) \quad (16)$$

보정하였고, 풍속은 고도편차가 +10m 이상인 cell만 선택하여,

$$u_h = u \left( \frac{h}{10} \right)^{0.15} \quad (17)$$

에 의해 구했고, 강수량은 100m 상승시 5% 증가하는 것으로 간주하여

$$P_h = P + 0.0005h \quad (18)$$

로 추정하였다.

### III. 지면모형의 적용

#### 3.1. 대상지역

경기도의 총 육지면적 약 12,000km<sup>2</sup> 가운데 습지, 호수, 하천이 6.8%이며, 도시지역이 12.8%, 그리고 나내지가 3.1%로서 이들을 제외한 식생피복 약 8,800 km<sup>2</sup>에 대하여 SiB2에 의한 증발산 추정이 가능하다. 식생면적 가운데 벼논과 활엽수림이 각각 26%씩을 차지하며, 그 뒤로 침엽수림 22%, 혼효림 19%, 밭 11%의 순서이다. 이들을 30×30m grid cell로 표현하면 벼논과 활엽수림이 각각 250만 개, 침엽수림 210만 개, 혼효림 180만 개, 밭 100만 개가 된다. 매 정시 종관기상관측은 서울, 인천, 수원, 강화, 양평, 이천, 동두천 등 7개 지점에서 수행하고 있으며, 하향단파(전천일사량)는 서울, 인천, 수원에서만 관측한다. 매시 기온, 풍속, 강수량자료를 얻을 수 있는 자동기상관측소도 50 여개 지점에 달해 관측밀도는 다른 지역에 비해 높은 편이다.

#### 3.2. 입력 GRID 준비

자립관 SiB2 모형의 구동은 기본적으로 지점(point) 단위로 이루어지며 지점별 입력자료를 정해진 규격의 파일양식에 맞추어 준비해야 한다. 반면 증발산의 추정은 지표특성이 상이한 넓은 지역을 대상으로 이루어

려야 실용성이 있으므로, SiB2 모형의 구동은 지역을 구성하는 다수의 격자점을 대상으로 순차적으로 수행되어야 한다. 이를 위해 전술한 과정에 의해 만들어지는 Data1과 Data2는 모두 IxJ matrix 형태의 ArcGIS GRID라는 공간자료로 저장된다. 즉 매시 기상자료는 좌표를 가진 임의의 격자점(I, J)마다 서로 다른 GRID의 동일한 위치에 저장된다. 이로부터 임의의 격자점 (I, J)에 해당하는 SiB2 입력파일을 순차적으로 만들고, 모형구동이 끝나면 그 출력물(증발산량)을 다시 IxJ matrix 형태의 Grid로 복원시키는 작업이 필요하다. 이 작업은 ArcGIS 제작사(ESRI Inc., Redland, California)에서 제공하는 라이브러리(GridIO)를 이용하여 그리드 자료의 파일 입출력을 수행하는 시스템을 구축함으로써 해결하였다. 이 시스템은 Grid를 입력받아 각 셀의 값을 추출하여 SiB2 모형의 입력파일을 생성하며, 이를 C++로 변환된 SiB2 프로그램에 전달하여 구동시킨다. 구동이 끝나면 출력되는 모의결과를 재결합하여 ArcGIS Grid 형태로 복원하는 일련의 과정으로 구성된다. Visual BASIC 및 C++로 작성된 이 시스템을 ArcLSM이라고 명하였다.

Data1에 포함되는 변수들은 각 격자점의 좌표값을 이용하여 그리드 자료로부터 추출한 뒤 특성에 해당되는 수치가 look-up table(LUT)로부터 할당된다. 예를 들어 식생 종류가 상록활엽수림(class=1) 이고 토성이 사질(class=1) 이라면 LUT들의 class 1에 해당되는 값들이 시간불변성 변수들에 할당되도록 하였다. 비교적 장기간(예, 월 단위)에 걸쳐 변화하는 엽면적지수와 같은 군락특성들은 월별 SR 및 NDVI 그리드를 입력받아 ArcLSM 내부에 구현된 식 (4)에서 (7)에 의해 계산된다.

Data2에 포함되는 변수들은 1 시간 간격으로 관측된 하향장파 및 단파복사, 기온, 수증기압, 풍속, 강수량 등으로서 기상관측소 실측자료를 앞에서 설명한 방법에 따라 공간내삽 하여 얻은 그리드로부터 추출한다.

단위면적이  $30 \times 30 = 900 \text{m}^2$ 인 1천만 개의 Grid cell로 구성된 경기도 지역 육상생태계에 대하여 불변 혹은 장기변화속성인 식생, 토성, 월별 NDVI 주제도를 작성하고 ArcLSM에서 사용할 수 있도록 준비하였다. 토양속성은 농업과학기술원에서 제작한 1:25,000 정밀수치토양도로부터 추출하였고, 식생분류는 환경부에서 제작한 5m 해상도 피복도를 30m 단위로 재분류하였으며, NDVI는 1999년의 Landsat 자료를 토대로 계산하였다. 2001년 8월 27일부터 2004년 3월 31일

까지 매시 기온, 강수량, 수증기압, 풍속, 그리고 일사량을 이 지역 내 8개 기상청 표준기상관측지점에서 수집하였다. 이들을 지형기후모형에 적용하여 30m 단위 격자점의 시간대별 기온, 강수량, 수증기압, 풍속 및 하향장파를 추정하고 ArcGIS grid로 저장하였다. 이 과정은 ArcGIS의 내장 매크로 언어인 Avenue script에 의해 자동화 하였다.

### 3.3. 모형의 구동

선행연구자에 의하면 SiB2에서 계산되는 증발산량은 토양수분상태에 가장 민감한 것으로 보인다(Cho and Kim, 2003; Mo *et al.*, 2004). 즉 모의 시작시간의 근권, 심토층, 그리고 층전층의 정확한 수분상태를 입력시켜야 한다. 이를 위해서는 모든 격자점의 토양수분을 직접 측정하거나 정점실측치를 합당한 공간내삽에 의해 변환시켜야 한다. 현실적으로 이러한 작업은 곤란하므로 대상시점 이전 10년 이상 장기 입력자료를 준비하여 사전구동을 통해 토양층의 수분상태를 안정화시키는 방법이 차선책으로 이용되어 왔다(Cho and Kim, 2003; Mo *et al.*, 2004). 그러나 넓은 지역을 대상으로 고해상도로 면적증발산을 추정할 경우 10년 이상 장기간의 시간별 입력자료를 준비하는 일이 쉬운 일이 아니므로 실용차원의 대안을 모색해야 한다. 본 연구에서는 우리나라의 강수특성상 여름철에 한 두 번은 지역적으로 수 백 mm 이상의 호우가 오는 것을 이용하였다. 만약 단기간에 집중적으로 많은 비가 내리면 SiB2에서 모사하는 지하 160cm 깊이까지의 토양공극(최대 70cm 정도)이 모두 물로 채워지는 이른바 포화용수량 상태에 도달하므로 토양수분변수(W1, W2, W3)를 모두 1.0으로 두고 모형을 구동시키는 것이다.

2001년 8월 25일부터 27일까지 경기도지역에 300mm 이상의 호우가 내렸으므로 모든 격자점의 토양수분이 포화상태일 것으로 가정하고 27일 자정부터 2004년 3월까지 한 시간 간격으로 SiB2모형을 구동하고 증발잠열을 계산하였다.

## IV. 검증실험

### 4.1. 실험장소

증발산 검증실험장소는 벼논피복의 경우 강화군 삼산면 석모도에 위치한 하리 포장, 활엽수림의 경우 광릉수목원 내 활엽수림으로서 모두 KoFlux 사이트로



등재된 곳이다(Kim and Rho, 2003; Fig. 3).

벼논에서의 증발산 실측이 장기간에 걸쳐 연속적으로 이루어진 곳은 하리 사이트가 국내에서 유일한데, 이 지역은 넓고 균질한 벼논으로 이루어져 미기상학적 이론을 적용하기에 적합한 장소이다. 연세대에서 운영하는 미기상 관측탑과 전원 공급, 컨테이너 등 제반 시설도 잘 갖추어져 있어 장기 연속 관측이 원활히 이루어질 수 있다. 벼논의 토성은 미사질 양토(토심 0~20cm) 및 미사토(토심 20~40cm)이며, 벼는 매년 5월 10일부터 16일 사이에 30×15cm로 재식되었고 최대 엽면적지수는 4.5±0.5이었다. 생육기간 중 6월 하순부터 7월 초순을 제외하고 4~10cm의 담수심이 유지되었다.

삼림 증발산 검증장소인 광릉 시험림은 서울에서 동북쪽으로 약 40km 떨어진 경기도 포천군 및 남양주군에 위치하며, 우리나라 중부지역을 대표하는 산림으로서 비교적 파괴되지 않은 고유 임상일 뿐 아니라

다양한 식물상과 동물상을 지니고 있다. 토양은 화강편마암을 모재로 A-B-C층위를 갖는 산성토양으로서 유기물이 풍부한 갈색토양이 전체 면적의 97%를 점하고 있다. 우리나라 평균축적(53m<sup>3</sup>/ha) 보다 높은 좋은 임상(232m<sup>3</sup>/ha)을 지니고 있는데, 대표 수종은 서어나무, 신갈나무, 굴참나무, 졸참나무, 까치박달나무, 층층나무, 소나무 등이다.

4.2. 플럭스 측정 및 자료 분석

벼논과 삼림군락의 관측탑에 삼차원 초음파 풍속계와 개회로 적외선 기체 분석기를 설치하고 0.1초 간격의 에디 공분산 방법으로 현열과 잠열 플럭스를 측정하였다. 복사(상하향 단파 및 장파 성분), 기온, 수증기압, 지중열 등은 30초 집록간격을 유지하였다. 벼논의 경우 담수층의 열 저류량을 고려하여 수온도 측정하였으며, 담수심, LAI, 엽장 및 엽폭, 초장 등은 최소한 일주일에 1회씩 측정하였다. 초음파 풍속계에서 관측되는 연직 풍속의 변동분과 고속반응 습도계 또는 적외선 기체 분석기에서 관측되는 절대습도 변동분의 공분산을 30분 단위로 계산하여 잠열 플럭스를 산출하였고 이를 시간적분 하여 증발산량을 구하였다. 삼림의 경우 센서 및 지면의 경사 효과를 제거하기 위해 Wesley(1970)에 따라 매 평균시간의 자료에 대해 두 번의 좌표변환을 수행하여 X축을 평균류 방향으로 정렬함으로써 3차원 초음파 풍향 풍속계의 tilt correction을 수행하였다. 또한 지표면으로부터 열과 수증기의 동시 연직 수송이 있을 경우에 대한 효과를 고려하기 위해 Webb et al.(1980)에 따라 잠열값의 WPL correction을 수행하였다. Foken and Wichura(1996), Hong and Kim(2002)에 따라 평균 풍속이 1ms<sup>-1</sup> 이상, 평균 운동량 플럭스가 음(-)일 경우, 적산된 난류 특성(ITC)의 이론값과 관측값이 40% 이내일 경우에 해당되는 자료만 분석하였다.

V. 결 과

5.1. SiB2에 의한 지면 열수지 추정 신뢰성

벼논의 경우 2002년 4월말부터 지금까지 에디공분산시스템을 연속기동 하였는데 낮 시간대 자료의 수집율은 70~80%였고, 밤 시간대 수집율은 50~60% 정도였다. 자료가 결측된 주요원인은 기기 set-up, 센서 calibration, system failure, 장마기간 등의 순서였다.

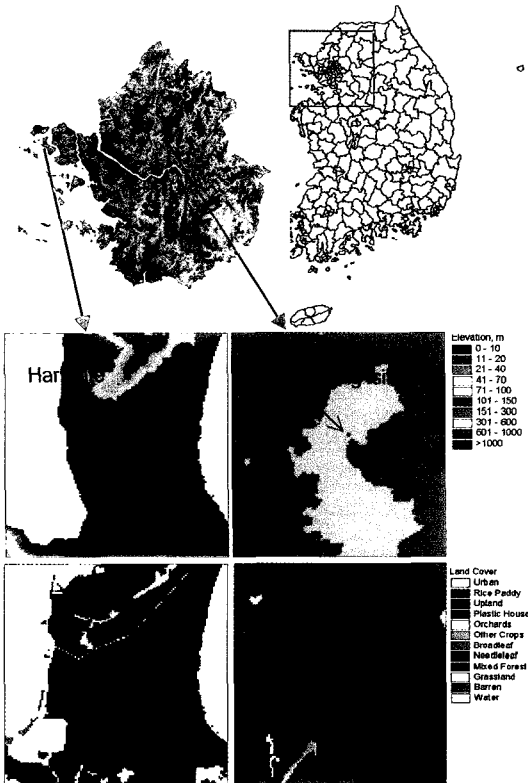


Fig. 3. Locations of 2 validation sites, one in rice paddy and the other in broadleaf deciduous forest. Zoomed images are the elevation (middle) and the land cover feature (bottom), respectively, on a 30m grid spacing.

전술한 품질관리 기준에 적용해 보면 약 65%의 자료가 “양호한 품질”에 해당하였으며, 이는 전체 기간의 약 절반에 해당하며, 외국의 사례에 견주어 낮지 않은 성적이다.

에너지 수지의 단합은 자료의 품위를 확인하는 유용한 척도인데 본 과제에서 얻은 에너지 수지의 단합은 전 기간 평균 80% 이상이며, 특히 여름 3개월 동안에는 90%이상으로서 만족할만한 신뢰도를 보였다. 이는 하리의 관측여건(바람, fetch 등)이 매우 양호하기 때문인 것으로 판단된다. 순복사에 대한 잠열과 현열의 비율은 각각 59-73%, 10-16%이며, Bowen Ratio는 생육기간 중 점차 감소하다가 등숙기간에는 크게 증가하였다.

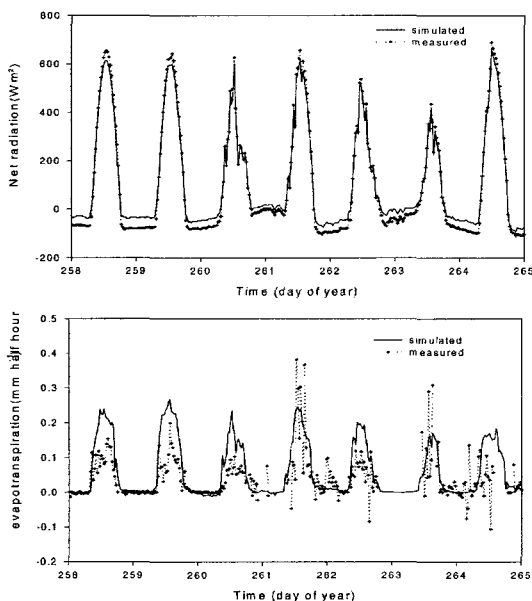
광릉수목원 활엽수림에서의 증발산 측정값에는 연직 수증기 플럭스항 외에 저류항(낮은 측정 높이/강한 바람 조건에서 무시 가능, 수증기 농도 프로파일 시스템으로 측정)과 이류항(단순균질지형에서 무시 가능, model 이용 평가)이 추가되므로 평탄지형에 비해 좋은 자료의 선별이 어렵다. 더구나 광릉 수목원 활엽수림 관측탑은 계곡의 하단부에 위치해 수평풍속이 약하고 풍향변이가 심하여 미기상학적 관측여건이 매우 불량한 곳이다. raw data의 수집에는 별 문제가 없었지만

품질기준을 통과하는 자료는 10%에 미치지 못할 정도로 하리의 벼논에 비해 훨씬 낮은 자료 획득율을 보였다. 따라서 장기적인 증발산 추세를 알아보기 위해서는 gap-filling이 불가피 하였다. 자립관 SiB2를 이용하여 2001년 9월 15~21일의 7일간 광릉 관측지의 활엽수림의 열수지를 모사한 결과 계산된 순복사는 낮 동안 측정된 경시변화양상과 매우 잘 일치한다(Fig. 4). 증발산도 양상은 비슷하지만 모형의 과다추정경향이 보인다. 이는 부정확한 균각전도도 값 때문인 것으로 추정되면, 모형에서 고려되지 않는 수간에 의한 열저류항 또한 영향을 미친 것으로 분석되었다.

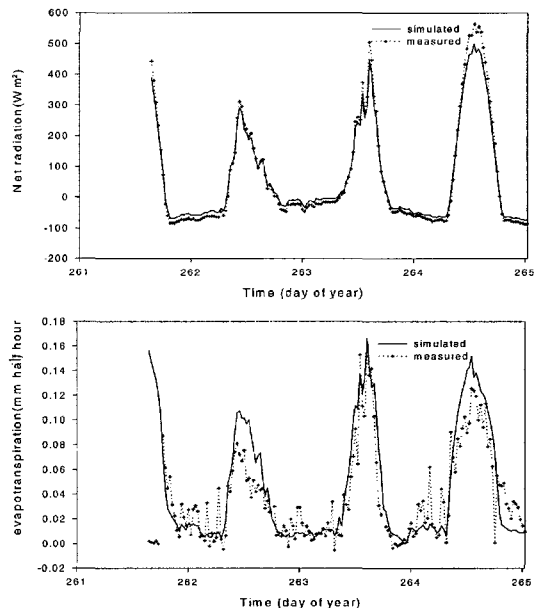
Fig. 5는 2001년 가을 하리 논에서의 순복사와 증발산 모사결과이다. 관개수가 없는 상태에서 순복사 에너지와 증발산을 자립관 SiB2가 매우 잘 모사하고 있음을 보여준다. 종합적으로 자립관 SiB2를 정점 증발산 추정용으로 사용하는 데 별 무리가 없음을 알 수 있다.

**5.2. 공간자료와 ArcLSM에 의한 면적증발산 추정 신뢰성**

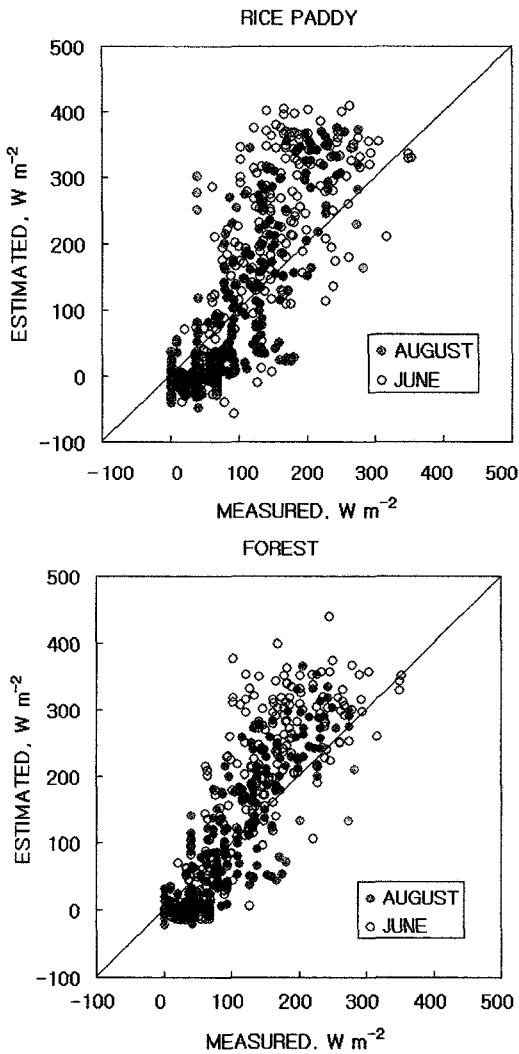
장마철을 피하여 2002년 6월 27일부터 7월 4일(8일간) 및 8월 18일부터 26일(9일간) 등 두 시기 동안



**Fig. 4.** Comparison of the simulated and the measured net radiation and evapotranspiration at Gwangneung experimental forest.



**Fig. 5.** Comparison of the simulated and the measured net radiation and evapotranspiration at Hari rice paddy (green leaf fraction = 0.5).



**Fig. 6.** Goodness of fit test for the spatially estimated evapotranspiration over land covers of a rice paddy (top) and a forest (bottom) with the measured flux data.

벼논과 활엽수림 플렉스 관측탑이 위치한 30×30m 격자점의 SiB2 모의 증발산값을 실제 관측값과 비교하였다(Fig. 6). 정점 적용 때보다 실측값과의 차이가 커지는 경향이나 결정계수로부터 판정된 추정값의 신뢰도는 70% 이상인 것으로 나타났다. 하리 관측지점은 석모도 벼논지대의 한 가운데 자리 잡고 있으며 반경 1km 이상이 균질한 벼논으로 둘러싸여 있어 관측여건이 매우 양호하나, 광릉수목원의 활엽수림 관측탑은 주로 남동향으로 균질한 활엽수림이 펼쳐있으나 남-남동계열의 바람이 불 때만 fetch가 확보되는 조건

이며 경사진 지형에다 계곡의 하부에 위치하고 있어 관측여건이 열악한 편이다. 실측값은 앞서 기술한 대로 gap-filling에 의해 추정된 것이긴 하나 SiB2 계산값과 잘 일치함을 보여준다.

**5.3. 증발산 공간변이**

Fig. 7은 광릉 시험림을 중심으로 한 사방 6×6 km 지역의 지표특성을 보여준다. 좁은 지역임에도 불구하고 고도, 지형, 토지이용 등 지표특성이 매우 다양함을 알 수 있다.

Fig. 8는 같은 지역에 대하여 SiB2 입력자료 가운데 data1 제작에 사용된 NDVI, 토성, 지표식생 주제도로써 NDVI는 1999년 6월의 Landsat 자료, 토성은 농업과학기술원에서 제작한 1 : 25,000 정밀수치토양도, 식생분류는 환경부에서 제작한 5m 해상도 피복도로부터 추출하였다.

Fig. 9은 SiB2 입력자료 중 data2에 속하는 것으로서 2003년 7월 31일 오후 1시의 분포를 보여준다.

ArcLSM에서 이들 자료를 입력받아 SiB2를 구동시켜 잠열플렉스를 계산하고, 같은 시간대에 FAO PM 방정식에 의해 추정한 기준증발산량과 비교한 것이 Fig. 10이다. 이 결과를 이용하면 일중 시간에 따라 지표식생으로부터의 수증기 플렉스 공간분포가 어떻게 변해 가는지 쉽게 알아볼 수 있다. 식생자료가 없는 빈 격자점들은 도시, 점적지역, 암석지역 등으로서 SiB2 구동이 불가능한 곳이다.

잠열플렉스를 24시간 적산하여 하루 동안 증발한 물의 량으로 환산한 것이 Fig. 11이다. 계산에 따르면 이 지역에서는 2003년 7월 31일 하루 동안 평균 1.4mm, 최대 2.69mm의 토양수분이 증발되었으며, 지역 내 증발산의 공간적인 변이를 표준편차로 표현하면 0.35mm이었다. 식생 종류별 평균값은 벼논의 경우 1.61, 활엽수림 1.40, 침엽수림 1.38, 그리고 혼효림에서 1.26mm이었다. 동일한 기상조건에서 계산된 기준증발산값은 공간평균 3.5mm, 최대 4.0mm로서 계산된 실제증발산은 기준증발산의 약 40%인 것으로 추정된다.

**VI. 고 찰**

기존 지표 증발산 연구에 널리 이용되어 온 지면모형을 객관적이며 신뢰성 있는 공간정보에 의해 그 적용영역을 확장한 것이 이 연구의 특징이라 할 것이다.

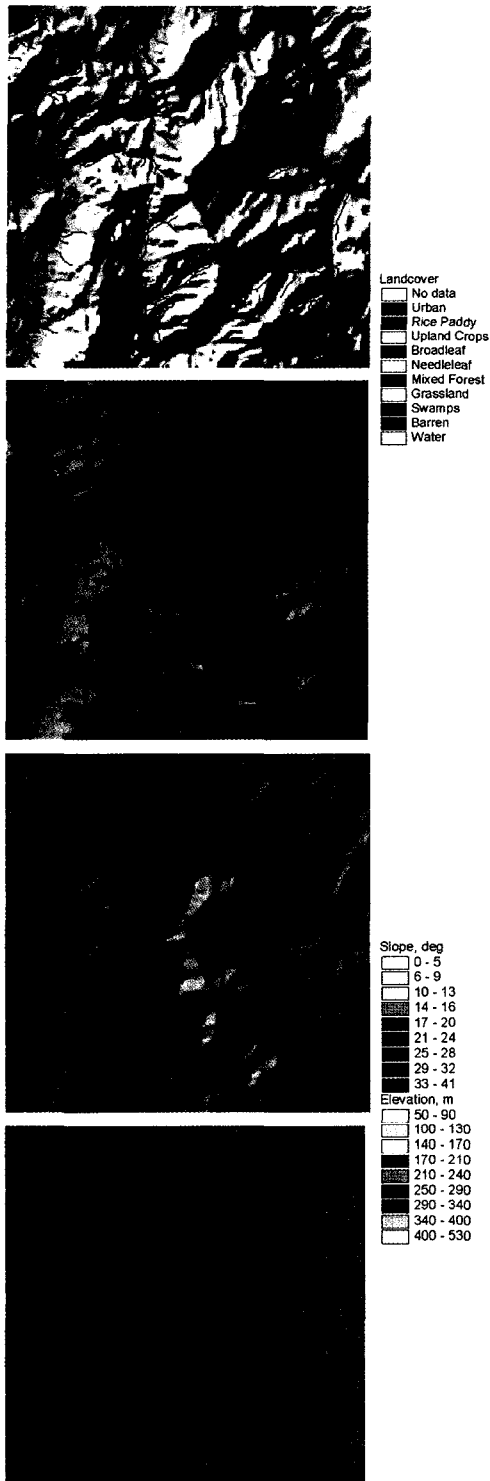


Fig. 7. Land surface characteristics of the study area as a potential determinant of local climates : aspect(A), land cover(B), elevation(C) and slope(D).

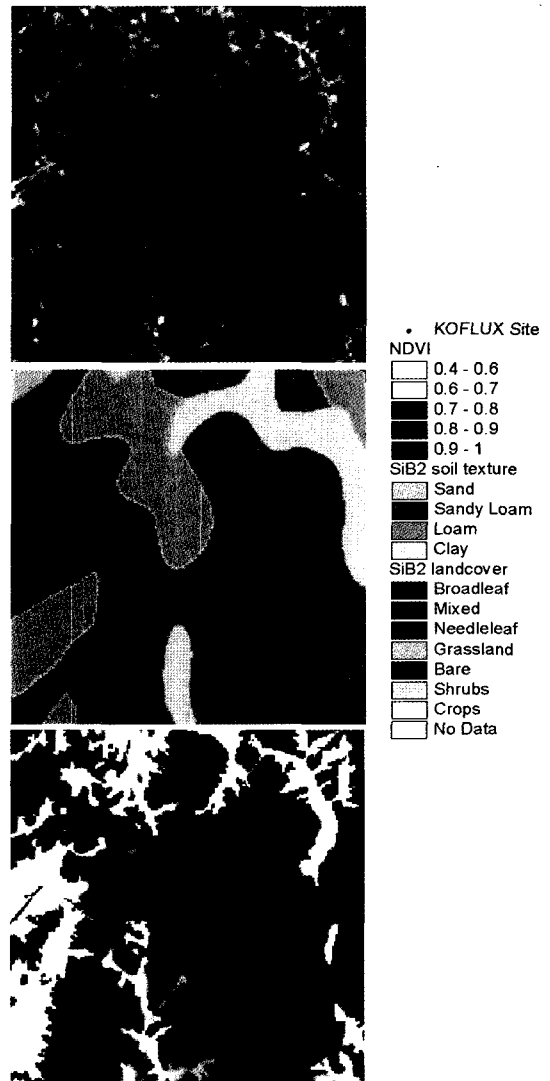
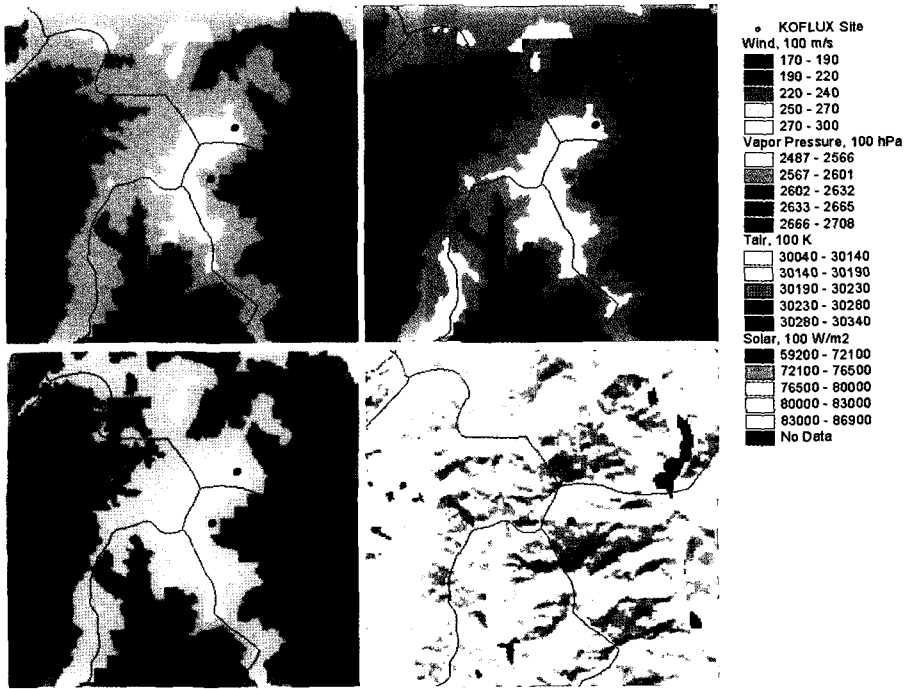


Fig. 8. Samples of gridded input data for time-invariant land surface characteristics : NDVI(A), soil texture(B), and biomes(C).

복잡지형 상의 일사, 기온 등 증발산 관련 소기후인자를 개관적으로 평가함으로써 기존 방법들에 비해 입력 자료의 신뢰성을 크게 향상시킨 점이 중요하다. 또한 이 방법은 사실상 종관기상자료만으로 원하는 지역 및 시간대의 고해상도 증발산 공간분포를 모의할 수 있게 해준다. 토양, 식생정보 등은 정부기관에 의해 이미 구축된 공간데이터베이스 혹은 주기적으로 갱신되는 위성원격탐사자료로부터 확보할 수 있으므로, 기상관서의 시간대별 기상자료 접근성만 양호하다면 이 방법을 적용하는 것은 어렵지 않다. 이 방법을 시스템 개



**Fig. 9.** Samples of gridded input data for atmospheric forcings : wind speed(A), water vapor pressure(B), air temperature(C), and solar radiation(D) for 12:00 on 31 July 2003.

발에 적극 활용한다면 향후 주요 집수역 (catchment) 혹은 행정구역별 증발산 실태감시용으로 발전시킬 수도 있을 것이다.

30m 공간해상도라면 거의 모든 경관규모에서 지형이나 지표특성을 상세히 반영할 수 있으므로 이 방법을 통해 추정된 증발산은 다양한 분야에서 그 용도를 찾을 수 있다. 우선 이 같은 고해상도 자료는 집수역의 지표수, 지하수량 산정 및 이를 위한 수문수지 분석 시 오랜 논란거리였던 증발산에 관하여 최종적이며 신뢰성 있는 판단근거가 된다(Andreassian *et al.*, 2004). 시간대별 증발산을 적산하면 하루 혹은 일정기간 동안의 증발산량을 쉽게 예측할 수 있으므로 토양 수분상태 및 기온경보, 관개 및 농업용수 관리 등 실용시스템도 구축가능하다. 궁극적으로는 이 방법을 전국도에 적용함으로써 나라 전체의 합리적인 수자원 관리를 도모할 수 있을 것이다.

적용면적을 전국으로 확대하기 위해서는 몇 가지 선결조건이 있다. 한반도 전역의 경우 80년대와 90년대의 평균적인 한반도 지표피복을 1 : 50,000 축척으로 분류한 수치지도가 환경부에 의해 제공되지만, 분류항

목이 단순하여 도시, 농지, 산림, 초지, 습지, 나지, 그리고 수역(water body)으로만 구분된다. 따라서 SiB2를 전국규모로 적용하기 위해서는 산림을 SiB2에서 요구하는 침엽수림, 활엽수림, 혼효림 등으로 나누어야 하며, 농지 가운데 벼논의 분류가 필수적이다. 산림의 세분류는 국립산림과학원에서 제작한 수치임상도를 이용하면 될 것이다. 벼논의 분류는 Koo *et al.*(2001)의 방법에 따라 월별 NDVI 합성영상 가운데 5월과 8월 자료를 대상으로 ISODATA 기법에 의해 유사한 특성을 가진 4 그룹(도시, 삼림, 수역, 농경지)으로 나누고, 8월에 삼림으로 분류된 화소들 가운데 5월에는 수역으로 분류되는 화소들만 발체하여 벼논으로 간주하면 된다.

그러나 이 방법은 완벽한 것이 아니며 지속적인 개선의 필요성과 그 가능성이 항상 존재하고 있다. 지면모형의 개선은 현재도 매우 활발하게 진행되고 있으므로 그 신뢰성은 더욱 제고될 것이지만, 특히 벼논 피복의 경우 선행연구에서 제기된 담수층의 저류항을 반드시 고려해야 한다(Kim *et al.* 2001). 또한 SiB2를 비롯한 대부분 지면모형의 취약점이라 할 수 있는 발

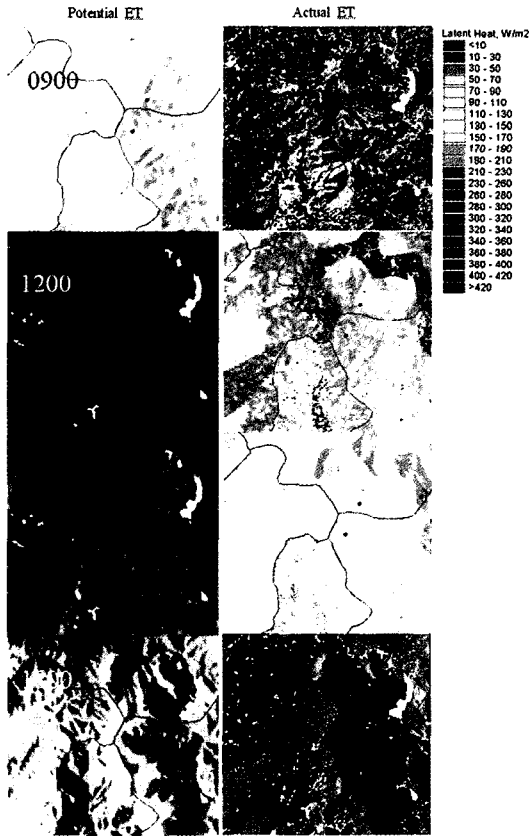


Fig. 10. Potential versus actual evapotranspiration grids at an hourly interval for the study area of 6 by 6km at a 30m resolution on 31 July 2003. Potential ET was estimated by the FAO Penman - Monteith method.

육단계(phenology) 추정과정의 개선이 따라야 한다. Data1의 경우 동일 식생으로 구성된 지면이라 할지라도 발육단계에 따른 차이점을 정확히 반영하기 위해 고해상도 위성자료의 획득주기를 단축해야 할 것이다. 각 구성품의 개선이 이루어진 다음에는 이들을 효율적으로 통합하고 편리하게 사용하기 위한 사용자 인터페이스의 제작도 뒤따라야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-1999-000-00175-0) 및 과학기술부 21세기 프런티어연구개발사업인 "수자원의 지속적 확보기술개발사업단"의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 고가의 측기를 대여해 준 서울대 농업과학공동기기센터(NICEM), 증발산 실

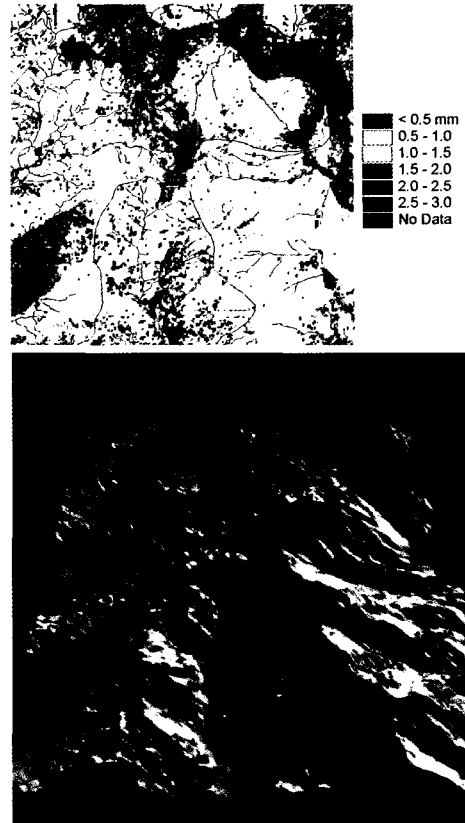


Fig. 11. Daily accumulated evapotranspiration for the study area of 6 by 6km at a 30m resolution on 31 July 2003 (top). The same ET values are draped over a 3-D terrain (bottom).

측자료를 제공해준 KoFlux 관계자 여러분들께 감사드립니다.

### 인용문헌

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998: *Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirement*. FAO irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United States, 300p.

Andreassian, V., C. Perrin, and C. Michel, 2004: Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. *Journal of Hydrology* **286**, 19-35.

Chae, H. S., 2001: Feasibility study of remotely sensed data for assessing areal evapotranspiration. *Proceedings 3rd Annual Conference of Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology*, 30-33.

Cho, J. I., and W. S. Kim, 2003: Evaluation of

- evapotranspiration in Solma river basin using soil-vegetation-atmosphere transfer scheme (SiB2). *Proceedings 5th Annual Conference of Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology*, 82-86.
- Chung, U., and J. I. Yun, 2004: Solar irradiance - corrected spatial interpolation of hourly air temperature in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* (In press).
- Chung, U., H. H. Seo, K. H. Hwang, B. S. Hwang, and J. I. Yun., 2002: Minimum temperature mapping in complex terrain considering cold air drainage. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **4**(3), 133-140.
- Chung, U., H. C. Seo, J. I. Yun, and K. H. Lee, 2003: An optimum scale for topoclimatic interpolation of daily minimum temperature in complex terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **5**(4), 261-265.
- Foken, T. H., and B. Wichura, 1996: Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* **78**, 83-105.
- French, A. N., T. J. Schmugge, and W. P. Kustas, 2002: Surface fluxes over the SGP site with remotely sensed data. *Physics and Chemistry of the Earth (Part B)* **25**, 165-172.
- Hong, J., and J. Kim, 2002: On processing raw data from micrometeorological field experiments. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 119-126.
- Kim, J., and C. S. Rho, 2003: KoFlux 2002 Synthesis. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(2), foreword.
- Kim, W. S., Y. Agata, S. Kanae, T. Oki, and K. Musiaka, 2001: General SVAT modeling - hydrological simulation by SiB2-Paddy in the Chao Phraya river basin, Thailand. *IAHS Publications* 270, 19-26.
- Koo, J. M., S. K. Hong, and J. I. Yun, 2001: A simple method for classifying land cover of rice paddy at a 1km grid spacing using NOAA-AVHRR data. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**(4), 215-219.
- Kustas, W. P., J. M. Norman, M. C. Anderson, and A. N. French, 2003: Estimating subpixel surface temperature and energy fluxes from the vegetation index - radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment* **85**, 429-440.
- Mecikalski, J. R., G. R. Diak, M. C. Anderson, and J. M. Norman, 1999: Estimating fluxes on continental scales using remotely sensed data in an atmosphere - land surface exchange model. *Journal of Applied Meteorology* **38**, 1352-1369.
- Mo, X., S. Liu, Z. Lin, and W. Zhao, 2004: Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over Lushi basin. *Journal of Hydrology* **285**, 125-142.
- Monteith, J. L., 1965: Evaporation and Environment. *19th Symposia of the Society for Experimental Biology*, University Press, Cambridge, **19**, 205-234.
- Moran, M. S., A. F. Rahman, J. C. Washburne, D. C. Goodrich, M. A. Weltz, and W. P. Kustas, 1996: Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates from semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology* **80**, 87-109.
- Naoum, S., and I. K. Tsanis, 2003: Hydroinformatics in evapotranspiration estimation. *Environmental Modelling and Software* **18**, 261-271.
- Ogunjemiyo, S. O., S. K. Kaharabata, P. H. Schuepp, I. J. MacPherson, R. L. Desjardins, and D. A. Roberts, 2003: Methods of estimating CO<sub>2</sub>, latent heat and sensible heat fluxes from estimates of land cover fractions in the flux footprint. *Agricultural and Forest Meteorology* **117**, 125-144.
- Penman, H. L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, A*, **194**, 120-145.
- Sellers, P. J., M. D. Heiser, and F. G. Hall, 1986: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of Atmospheric Science* **43**, 305-331.
- Sellers P. J., D. A. Randall, G. J. Collatz, J. A. Berry, C. B. Field., 1996: A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate* **9**, 676-705.
- Sequin, B., J. P. Lagouarde, and M. saranc, 1991: The assessment of regional crop water conditions from meteorological satellite thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment* **35**, 141-148.
- Webb, E. K., G. I. Perman, and R. Leuning, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water transfer. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* **106**, 85-100.
- Wesley, M. L., 1970: Eddy correlation measurements in the atmospheric surface layer over agricultural crops. Ph.D. dissertation, University of Wisconsin, Madison.