

MODIS 위성 영상 기반의 일차생산성 알고리즘 입력 기상 자료의 신뢰도 평가: 미국 Corn Belt 지역을 중심으로

이지혜* · 강신규*[†] · 장근창* · 고종환** · 홍석영***

*강원대학교 자연과학대학 환경과학과

**전남대학교 농업생명과학대학 식물생명공학부

***농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료관리과

The Evaluation of Meteorological Inputs retrieved from MODIS for Estimation of Gross Primary Productivity in the US Corn Belt Region

Jihye Lee*, Sinkyu kang*[†], Keunchang Jang*, Jonghan Ko** and Sukyoung Hong***

*Department of Environmental Science, College of National Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

**Division of Plant Biotechnology, College of Agriculture and Life Science, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

***Soil and Fertilizer Management Division, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration,

Suwon 441-707, Korea

Abstract : Investigation of the CO₂ exchange between biosphere and atmosphere at regional, continental, and global scales can be directed to combining remote sensing with carbon cycle process to estimate vegetation productivity. NASA Earth Observing System (EOS) currently produces a regular global estimate of gross primary productivity (GPP) and annual net primary productivity (NPP) of the entire terrestrial earth surface at 1 km spatial resolution. While the MODIS GPP algorithm uses meteorological data provided by the NASA Data Assimilation Office (DAO), the sub-pixel heterogeneity or complex terrain are generally reflected due to coarse spatial resolutions of the DAO data (a resolution of 1° × 1.25°). In this study, we estimated inputs retrieved from MODIS products of the AQUA and TERRA satellites with 5 km spatial resolution for the purpose of finer GPP and/or NPP determinations. The derivatives included temperature, VPD, and solar radiation. Seven AmeriFlux data located in the Corn Belt region were obtained to use for evaluation of the input data from MODIS. MODIS-derived air temperature values showed a good agreement with ground-based observations. The mean error (ME) and coefficient of correlation (R) ranged from -0.9°C to +5.2°C and from 0.83 to 0.98, respectively. VPD somewhat coarsely agreed with tower observations (ME = -183.8 Pa ~ +382.1 Pa; R = 0.51 ~ 0.92). While MODIS-derived shortwave radiation showed a good correlation with observations, it was slightly overestimated (ME = -0.4 MJ day⁻¹ ~ +7.9 MJ day⁻¹; R = 0.67 ~ 0.97). Our results indicate that the use of inputs derived MODIS atmosphere and land products can provide a useful tool for estimating crop GPP.

Key Words : MODIS, Crop Gross primary productivity, LUE

접수일(2011년 4월 29일), 수정일(1차 : 2011년 7월 22일), 게재확정일(2011년 7월 25일).

[†] 교신저자: 강신규(kangsk@kangwon.ac.kr)

요약 : 다양한 공간규모에 대해서 식생의 생산성을 추정하기 위해 대기와 생태계내의 탄소순환 과정을 모니터링 하는 것은 탄소순환과정과 원격탐사기법을 결합함으로써 가능하다. 그 대표적인 예로서 미국 항공우주국(NASA)에서 개발한 지구관측시스템(Earth Observing System, EOS)은 총 일차생산성(Gross Primary Productivity, GPP), 순 일차생산성(Net Primary Productivity, NPP)을 전 지구에 대해 1 km의 공간해상도로 제공한다. 그러나 MODIS의 생산성 추정에 기상입력자료로 이용되는 The NASA Data Assimilation Office (DAO)자료는 $1^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 의 거친 해상도를 가지기 때문에 지역규모에서 지표기상의 상세한 공간적인 이질성을 반영하기 어렵다. 본 연구에서는 MODIS의 Aqua와 Terra 위성의 영상만을 이용하여 생산성을 추정하기 위한 입력자료로 사용되는 일 단위 일사량(MJ day^{-1}), 일 최저기온($^{\circ}\text{C}$), 낮 시간 평균 대기수증기압 포차(Vapor Pressure Deficit, Pa)을 5 km 해상도로 각각 추정하였다. 각각의 입력자료의 평가를 위해 미국 중서부 Corn Belt 지역 내에 위치하고 있는 7 개소의 지상기반의 관측자료를 수집하였다. MODIS 위성영상을 이용하여 추정한 기상입력자료와 관측자료를 비교한 결과, 일 최저기온은 ME와 상관계수가 각각 0.83에서 0.98, -0.9°C 에서 $+5.2^{\circ}\text{C}$ 의 범위로 양호한 상관성을 보였다. VPD는 약간 산개하는 경향을 보인다($\text{ME} = -183.8 \text{ Pa} \sim +382.1 \text{ Pa}$; $R = 0.51 \sim 0.92$). 반면에, 일 단위 일사량은 MODIS가 약간 과대평가하는 경향을 보였지만 대부분의 지역에서 관측자료와 유의한 일치도를 보였다($\text{ME} = -0.4 \text{ MJ day}^{-1} \sim +7.9 \text{ MJ day}^{-1}$; $R = 0.67 \sim 0.97$). 본 연구에서는 맑은 날에 대해서 MODIS 위성영상으로부터 추정된 기상입력자료가 MODIS가 제공하는 기상입력자료보다 상세한 지표 기상의 이질성을 반영한 자료를 생산할 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

육상 식생의 일차생산성(primary productivity)은 지구 탄소순환의 중요한 요소이며(Gitelson *et al.*, 2006), 인간에 의해 소비되는 식량과 섬유, 연료의 자원이기도 하다. 특히 전 세계적으로 곡물가가 상승하고 기후이변 등에 의해 세계 각국의 작황(Crop yield)의 불확실성이 증대하는 상황에서 작물에 대한 생산성 추정, 즉 작황의 추정은 지구의 기후변화에 대한 작물성장의 반응을 이해하는 과학적인 측면에서, 그리고 많은 식량과 사료를 외국에 의존하는 우리나라의 경우 식량안보를 위해서도 매우 중요하다. 전 지구, 대륙, 혹은 주요 곡물생산지역에 대한 광역규모의 작황추정에 위성영상을 이용한 접근이 널리 사용되고 있다(김이현 외, 2011). 일례로, 일차생산성모형과 원격탐사기법을 결합함으로써 미 항공우주국(NASA)의 지구관측시스템(Earth Observing System, EOS)은 Moderate Resolution imaging Spectroradiometer (MODIS) 위성영상을 이용해 전 세계에 대한 1 km 해상도의 총 일차생산성(Gross Primary Productivity, GPP)과 순 일차생산성(Net Primary Productivity, NPP) 자료를 제공한다

(Running *et al.*, 2000).

MODIS는 Terra와 Aqua 위성에 탑재되어 전 지구를 1-2일의 간격으로 촬영한 상세한 시간 간격의 분광자료를 제공한다. 우리나라와 같이 중위도 지역의 경우 두 대의 MODIS 위성으로부터 각각 낮에 2회, 밤에 2회 등 총 하루에 4회의 영상을 제공받는다. MODIS는 36개 분광대의 다양한 분광정보로부터 추정된 육상, 대기, 해양의 다양한 생물리 변수를 제공한다. 식생의 일차생산성과 관련하여 MODIS는 Monteith (1977)가 제안한 빛 이용효율(Light Use Efficiency, LUE) 모형을 이용한 GPP과 NPP 자료를 제공한다. 이 중 GPP 자료는 8일 단위의 1 km 해상도를 가진다. 연간 NPP는 일 년 동안 생체량(Biomass)으로 고정된 총 탄소의 양이므로, 단 년생 작물의 생체량(Biomass)과 작황을 추정하는 데에 사용될 수 있다.

그러나 EOS MODIS의 GPP와 NPP 자료를 다양한 작물의 작황추정에 응용하기에 몇 가지 어려움이 있다. 첫째, MODIS LUE 모형은 콩, 옥수수, 밀과 같은 다양한 작물을 구분하지 않고, 작물을 하나의 식생형으로 다룬다. 즉, 모든 작물에 대해 동일한 모수값(Parameter)을 적용한다. 따라서 동일한 기상조건이라 하더라도 콩,

옥수수 등 작물 간의 작황이 다른 것을 반영하지 못한 다. 둘째, MODIS LUE 모형의 입력자료로 사용되는 MODIS Fraction of incident Photosynthetically Active Radiation (FPAR)와 Leaf Area Index (LAI) 자료가 구름의 영향을 받아 결측이 생기거나, 신뢰도가 낮은 경우가 발생한다. 물론 8일 간의 최대값 중첩법 (Maximum composite method)를 이용해 구름의 영향을 어느 정도 저감한 자료를 제공하나, 장기간의 구름이 낀 경우 종종 사용할 수 없는 값을 생산한다. 셋째, MODIS의 생산성 추정에 기상입력자료로 이용되는 The NASA Data Assimilation Office (DAO)자료는 $1^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 의 해상도를 가지기 때문에 지역규모에서 지표기상의 상세한 공간적인 이질성을 반영하기 어렵다.

DAO를 대신하여 보다 상세한 지표기상변수를 제공하는 데에는 전 지구적(예, GDAS) 혹은 지역규모에서 제공되는 기상모형자료(예, MM5 혹은 WRF)를 사용할 수 있다. 그러나 지역에 따라 상세한 기상모형자료를 가용하지 않기도 하며, MODIS 대기자료의 공간해상도가 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 인 것에 비해 거친 해상도를 가진 경우가 많다. MODIS는 동일한 센서로부터 대기 기상자료와 식생자료를 함께 제공하기 때문에 MODIS의 기상자료를 LUE 모형의 입력자료로 사용할 수 있다면, 기상모형자료의 유무에 상관 없이 전 지구 어느 곳에서도 합리적인 공간해상도로 적용 가능한 일차생산성 자료를 생산할 수 있다.

이 연구에서는 앞서 거론한 기상입력자료의 문제를 개선하기 위해 MODIS의 대기자료를 이용해 LUE 모형의 입력자료를 생산하는 기법을 탐구하였다. MODIS의 위성영상만을 이용하여 LUE 모형에 입력자료로 사용되는 일 단위 일사량(MJ day^{-1}), 일 최저기온($^{\circ}\text{C}$), 낮 시

간 평균 대기수증기압 포차(Pa)을 각각 추정하고, 각각의 입력자료들을 지상기반의 관측자료와 비교함으로써 그 적용 가능성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

1) 연구지역

이 연구에서는 작물의 생산성을 추정하기 위해 이용되는 MODIS 위성영상으로부터 추정된 입력자료를 평가하기 위해 미국 중서부 Corn Belt 지역 내에 위치하고 있는 7 개소의 Ameriflux의 자료를 수집하였다 (<http://public.ornl.gov/ameriflux/>). 미국의 Corn Belt 지역은 Illinois, Iowa 양 주가 중심이 되는 미국의 중서부에 걸친 넓은 지역에 형성된 세계 제 1의 옥수수 재배지역이다. 연강수량 1,000 mm 내외로 대륙성 기후를 보이며, 비옥한 토양지대로 이루어져 있다. 선정된 7 개소의 플렉스 관측 연구지는 Iowa, Kansas, Nebraska, Illinois주에 위치하고 있으며 각각의 정보는 Table 1와 같다. Bo1과 IB1는 Illinois 주에 위치해있으며, 옥수수(Corn)과 콩(Soybean)을 윤작하는 특징을 보인다. Bo1지역의 식생형은 IGBP에 의해 농경지로 분류된다. IB2는 Illinois주에 위치한 또 다른 플렉스 타워이며, 농작물과 자연 식생이 혼합된 식생형을 가진다. 에디 공분산 시스템을 이용한 플렉스 관측을 이용하여 하나는 대평원 지역에, 다른 하나는 농경지에서 자료를 생산해내고 있다(IB2). Nebraska 지역의 Ne1는 지속적으로 옥수수가 재배된 농경지이며, Kansas지역에 위치한 W1r는 C3, C4 식물이 혼합된 초지이다. MOz는 Missouri 중부의 Ozack 지역 내에 위치하고 있으며,

Table 1. Characteristics of seven flux tower sites used in this study

Sitename	state	Location		IGBP type	Available year
		Latitude	Longitude		
Bondville(Bo1)	IL	40.0062	-88.2904	Crop Land	2003-2006
Fermi Prairie(IB1)	IL	41.8593	-88.2227	Crop Land	2005-2006
Fermi Agricultural(IB2)	IL	41.84062	-88.241	Natural vegetation	2004-2006
Walnut river(W1r)	KS	37.52083	-96.855	Grass Land	2003-2004
Mead Irrigated(Ne1)	NE	41.46506	-96.4766	Crop Land	2003-2006
Missouri Azark(MOz)	MO	38.74411	-92.2	Deciduous Forest	2004-2006
ARM SGP Main(ARM)	OK	36.6058	-97.4888	Grass Land	2003-2006

이 지역은 중부 견목 지역과 초지 지역간의 생태학적으로 중요한 전이대(Transitional zone)에 있어 위치적으로 중요하다. 임관의 높이는 24.2 m이고 식생형은 낙엽 활엽수림이다. ARM는 Oklahoma 지역의 ARM SGP 중심에 위치하고 있으며 이 지역은 현장 조사와 원격 탐사 실험으로 구성되어 있는 가장 광범위한 기후연구지역이다(Table 1).

2) 자료수집

(1) 위성 자료

이 연구에서는 위성영상 기반의 생산성을 추정하기 위한 입력자료를 생산하기 위해 MODIS 위성 영상을 수집하였다(Table 2). 2003년부터 2006년까지의 위성 영상자료를 MODIS WIST (<https://wist.echo.nasa.gov/api>)에서 무상으로 다운받아 사용하였다. MODIS 위성 영상은 전 지구 규모의 육상, 대기 및 해양환경의 변화를 모니터링 하기 위한 목적으로 NASA에서 개발한 EOS 프로그램에 의해 1999년과 2002에 발사된 Terra와 Aqua 위성에 탑재된 MODIS센서에 의해 제공되는 영상이다. Terra 위성은 북에서 남으로 오전 10시 30분경에 적도를 통과하며, Aqua 위성은 그 반대로 오후 1시 30분경에 적도를 통과하는 극궤도를 가진다. MODIS는 태양 동주기 궤도를 가지며 36개의 밴드를 이용하여 하루 혹은 이틀에 한번씩 지구 표면을 관찰한다.

MODIS의 육상자료는 Sinusoidal grid tiling system으로 지구 전체를 36 (Horizontal) × 18 (Vertical) 개의 tile로 제공되며, 각각의 tile은 10° × 10°의 크기를 갖는다. 육상 자료의 경우 대기자료와는 달리, 관심 지역의 지리적 위치가 이미 고정되어 있다. 연구에서 사용되는 MODIS 알베도 자료(MODIS43, MCD43)는 Black Sky Albedo (BSA)와 White Sky Albedo (WSA)를 1 km의 공간해상도로 제공한다. 알베도란 입사되는 하강 복사 플럭스에 대한 반사되어 나오는 상승 복사 플럭스의 비율로 정의되며, MODIS43의 BSA와 WSA의 10번째 밴드 자료(단파장 영역)을 사용하여 추정할 값이다.

MODIS의 대기 자료는 지리적 좌표가 이미 정해져 있는 육상자료와는 다르게 매일 위성이 지나가는 경로의 차이에 따라서 영상마다 고유한 위/경도의 위치정보를 가진다. 따라서 대기 자료를 처리할 시에 이들 고유한

위/경도 지리정보를 항상 고려해야 한다. MODIS 대기 프로파일 자료(MODIS07)는 지표면의 온도(K), 압력(hPa), 대류권계면 높이(hPa), 기온과 이슬점 온도의 프로파일(K), 총 오존량(Dobsons), 안정도지수(K), 수증기량(cm), 구름 탐지(no unit), 위도(degree), 경도(degree)의 다양한 자료를 제공한다. 이 중 기온과 이슬점 온도는 20개의 각각 다른 대기압에 따라 20개의 층으로 구분한다. 이들 모든 자료는 1 km 픽셀이 25개 모여 이루어진 5 km × 5 km 해상도의 Level 2 자료로 MODIS의 통과시점인 밤과 낮에 각각 하나씩 생산된다. MODIS 에어로졸 자료(MODIS04)는 전지구적으로 대기와 해양 모든 지역에 걸쳐 1 km 픽셀이 100개 모여 이루어진 10 km × 10 km 해상도의 Aerosol Optical Thickness (AOT)자료를 제공한다. 모든 대기자료는 Georeferencing 과정을 거쳐 경도와 위도 정보를 포함한 영상으로 제작하였으며, MODIS07는 기온, 이슬점 온도, 기압, 오존층 두께, 천정각 등의 자료가 포함되도록 영상을 제작하였다. 기온과 이슬점 온도의 경우 기압에 따라 20개의 Layer를 모두 포함하도록 하였다. 또한 각 픽셀당 “Number of Clear pixel”이라 불리는 청천 화소수, 즉 25개의 1 km 픽셀 중에서 구름이 없는 (Clear) 픽셀을 수를 갖고 있어, MODIS07 각 픽셀에 대한 구름의 유무를 추정하는 데 사용하였다. Clear pixel이 25이면 위성 영상이 구름의 영향이 없다는 것을 의미한다. 이 연구에서는 Clear pixel의 수가 20 이상인 영상만을 연구에 사용하여 일 단위 일사량을 추정하였다.

Aerosol Optical Depth (AOD)는 MODIS04 영상의 0.47 μm, 0.55 μm, 0.67μm에서의 보정된 값으로 제공되는데 특히 0.47 μm과 0.55 μm에서의 AOD 정보를 일사량 추정의 입력 자료로 사용하였다. 하지만 맑은 날에도 AOD 자료가 생성되지 않는 경우가 많았고, 따라서 AOD 자료의 상대적으로 낮은 획득률은 일사량의 획득물에 큰 영향을 미침을 발견하였다. 이 연구에서는 AOD의 획득률 향상을 위해서 Jang *et al.* (2010)에 의해 제안된 에어로졸 내삽 방법을 이용하여 맑은 날에 결측된 AOD 자료를 추정하였다. 즉, 2003년부터 2006년까지의 연구지역에 해당하는 에어로졸 자료에 대해 월별 평균값을 구한 후, 결측된 에어로졸 픽셀에 대해서 월별 평균값을 적용하였다(Table 2).

Table 2. MODIS input variables for estimating ET and their temporal and spatial resolution

variables	MODIS Product	Temporal/Spatial Resolution
surface meteorological data	Aerosol	MODIS04 5min / 10km
	Air temperature	MODIS07 5min / 5km
	Vapor Pressure	MODIS07 5min / 5km
Land surface parameters	Albedo	MODIS43 16days / 1km
	LAI and FPAR	MODIS15 8days / 1km

(2) 지상관측자료

MODIS에서 산출한 GPP 알고리즘 입력자료의 신뢰도 평가를 위한 지상관측자료로써 Ameriflux의 관측자료를 수집하였다(http://public.ornl.gov/ameriflux/). 이 연구에 사용한 7 개소의 플럭스 관측 연구지는 일사량, 온도, VPD, 토양 온도, Soil water content, Net Ecosystem Exchange (NEE), GPP등의 변수들을 30분 단위와 일 단위의 자료로 제공하고 있다. 본 연구에서 이용한 Level 4 플럭스 타워 자료는 보정된 자료와 원 자료의 질에 대한 Flag를 포함하며, 다양한 시간단위에 걸쳐 보정된 자료를 제공한다. 이 연구에서는 2003년부터 2006년까지의 4년간 자료를 수집하였다.

3) MODIS17 알고리즘

MODIS GPP 알고리즘은 1977년에 Monteith에 의해 제안된 LUE모형에 근거를 둔다. Monteith는 물과 영양분의 공급이 충분한 일년생 작물의 생산성, 즉 NPP가 그들이 흡수하는 빛 에너지의 양(Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR)에 선형적인 관계가 있다고 제안하였다. APAR는 일조시간이나 잠재 직달 일사의 계절적이고 지리학적인 변화에 의존한다. 따라서 Monteith의 가설은 빛을 흡수할 수 있는 잎의 양을 고려하는 생물학적인 제한인자와 식물이 이용 가능한 일사량을 고려하는 기상학적인 제한인자의 개념을 모두 포함한다. 그러나 같은 종일지라도 임관(Canopy)의 구조나 온도, PAR의 밀도, 증발의 수요, 토양수분의 이용, 영양분의 이용 등의 여러 자연적인 요인들이 생산성에 영향을 미친다. 따라서 LUE모형에서 식물의 실제 빛 이용효율은 최적의 조건에서 발휘되는 잠재 혹은 최대 빛 이용효율보다 작아진다. 따라서 식물이 흡수한 광합성 유효 복사량(PAR)에 잠재 빛 이용효율을 곱한 후, 다시 환경에 의해 제한 받는 정도를 제한으로써 식물의 일차생산성을 추정할 수 있다. 이러한 간

단한 접근은 특히 위성영상을 이용한 일차생산성 추정 알고리즘에 널리 응용되어 왔으며, 미 항공우주국의 MODIS 일차생산성 알고리즘 역시 Monteith (1977)의 개념을 따른다. 다만, 복사이용효율의 제한인자를 고려하는 방식에서 각 알고리즘마다 차이를 보이며, MODIS 일차생산성 알고리즘은 전 지구 규모의 적용을 목적으로 하였기에 온도와 VPD만을 제한인자로 고려하는 단순한 방식을 취하였다(식 (1)-(2)).

$$GPP = \varepsilon \times APAR \quad (1)$$

$$APAR = PAR \times FPAR = FAPAR \times (0.45 \times R_s) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} \times T_{MIN_scalar} \times VPD_{scalar} \quad (3)$$

MODIS GPP 알고리즘에서 ε_{max} 는 잠재 혹은 최대 빛 이용효율을 뜻하며, 이것은 식물이 광합성을 하기 위한 모든 조건이 충분하고 오직 광량만이 제한인자일 때의 빛 이용효율을 뜻한다. ε_{max} 는 식생형에 따라 상이한 값을 가진다(Field *et al.*, 1995; Prince and Goward, 1985; Turner *et al.*, 2003). 식물의 생산성에 영향을 주는 온도와 VPD에 의한 환경제한인자인 T_{min_scalar} 와 VPD_{scalar} 는 모두 0에서 1사이의 값을 가지며, 각각의 제한인자에 대해 2개의 모수값을 정해주어야 한다(식 (3)). 이들 모수값은 MOD17 GPP 알고리즘의 Biome Property Look-Up Table (BPLUT)에 정의되어 있다(Heinsch *et al.*, 2003)

MOD17 GPP 계산에 입력자료로 사용되는 광합성 유효 복사량(PAR)과 일 최저기온, 낮 시간 평균 (Daytime mean) VPD 등을 일 단위 기상자료인 DAO 으로부터 제공받으며, FPAR는 MODIS15 영상자료를 이용한다. FPAR 영상은 입사 PAR 중에서 임관에 흡수된 PAR의 비율을 뜻하며 8일 간격으로 제공된다. 매 8일 동안의 최대값을 그 기간을 대표하는 값으로 취하는데, 이는 구름에 의한 자료결손을 해결하는 하나의 기법으로 Maximum composite method라 불린다. 흔히

PAR는 일사량으로부터 추정될 수 있는데 이는 지표에 입사하는 일사량의 총량에서 식물이 활발히 흡수하는 가시광선의 비율이 전지구적으로 보아 대략 45% 정도의 평균값을 보이기 때문이다.

이 연구에서는 MOD17 GPP 알고리즘의 기상입력자료인 일사량, 일 최저기온, 낮 시간 평균 VPD등을 MODIS 대기자료로부터 직접 산출하는 방법을 개발하였고, 지상관측자료와의 비교평가를 수행하였다. 이 방법에 의해 MOD17 GPP에 사용되는 DAO 기상자료에 비해 상당히 향상된 공간분해능(5 km × 5 km)의 기상자료를 제공함으로써 지표 기상상의 이질성을 보다 효과적으로 반영한 일차생산성을 추정할 수 있다.

4) 입력자료 개발

(1) 일 최저기온

MODIS GPP 알고리즘에서는 생산성 추정에 이용되는 입력자료 중 하나으로써 일 단위의 최저기온을 환경제한인자로서 적용한다. 이 연구에서 새벽 1시 30분경에 상공을 통과하는 Aqua 위성에 탑재된 MODIS 센서에서 산출한 기온을 추출하여 관측된 일 최저기온과 비교함으로써 사용가능성을 평가하였다. Aqua 위성은 같은 지역을 각각 새벽과 낮 1시 30분경에 통과한다. 따라서 본 연구에서는 새벽의 온도를 일 최저 기온이라고 가정하였다. MODIS07 대기 프로파일 자료는 20개의 각각 다른 대기압에 따라 연직적으로 구분된 기온과 이슬점 온도를 제공한다(Seemann *et al.*, 2003). 이 연구에서는 Aqua위성의 대기 프로파일 자료인 MYD07_L2의 대기 최하층 자료의 기온을 추출하였다.

(2) 낮 시간 평균 VPD

일 최저기온과 마찬가지로 Aqua위성의 대기 프로파일 자료인 MYD07_L2에서 대기 최하층 자료에 해당하는 기온과 이슬점 온도를 추출하였다. 이슬점 온도로부터 현재 수증기압을 추정하였고, 기온으로부터 추정한 포화 수증기압과의 차이로 VPD를 산출하였다(Ryu *et al.*, 2008) (식 (4)).

$$VPD = (e_s - e_a) \times 1000 \quad (4)$$

$$e_a = (6.11 \times \exp(\frac{19.59 \times (T_d - 273.3)}{T_d})) \times \frac{1}{10} \quad (5)$$

$$e_s = (6.11 \times \exp(\frac{19.59 \times (T_a - 273.3)}{T_a})) \times \frac{1}{10} \quad (6)$$

e_a 는 현재 수증기압(Actual vapor pressure, kPa), e_s 는 이슬점 온도인 $T_d(^{\circ}C)$ 에서 포화된 수증기압(Saturated vapor pressure, kPa)이다(식 (5)-(6)).

이 연구에서는 일차적으로 각각 오전과 오후에 상공을 지나는 Terra와 Aqua 위성 통과 시간의 순간 VPD를 추정하였다. MOD17 GPP 알고리즘의 입력값은 낮 시간 평균 VPD이다. 각 플렉스 타워에서 관측한 낮 시간 평균 VPD 자료를 이용해, Terra와 Aqua MODIS로부터 추정한 VPD와 이 두 값을 평균한 VPD 값을 각각 평가하여 어떤 자료가 최적의 입력자료로 사용할 수 있는가를 판단하였다.

(3) 일 단위 일사량

일 단위 일사량을 추정하기 위해서 직달 일사량과 산란 일사량을 고려한 Bird and Hulstrom (1981)에 의해 제안된 Bird's Clear Sky Model을 MODIS 자료에 적용한 Jang *et al.* (2008)의 방법을 이용하였다. 지표에 입사하는 직달 일사량(I_{dir} , $W m^{-2}$)과 산란 일사량(I_{dif} , $W m^{-2}$)을 각각 아래의 식 (7)와 식 (8)을 이용하여 계산하였다.

$$I_{dir} = I_0 (\cos z)(0.9662)T_R T_O T_{UM} T_W T_A \quad (7)$$

위 식 (7)에서 I_0 는 태양 상수 ($1353.0 W m^{-2}$), z 는 천정각 (degree), T_R 은 Rayleigh 산란에 대한 투과율, T_O 는 오존흡수를 고려한 투과율, T_{UM} 은 균일하게 혼합된 가스(CO_2 , O_2)을 고려한 투과율, T_W 는 수증기흡수에 의한 투과율, T_A 는 에어로졸에 의한 흡수와 산란을 고려한 투과율을 각각 나타낸다.

$$I_{dif} = I_0 (\cos z)(0.79) T_O T_W T_{UM} T_{AA} \frac{[0.5(1 - T_R) + B_a(1 - T_{AS})]}{[1 - M + M^{1.02}]} \quad (8)$$

산란 일사량은 에어로졸 흡수에 의한 투과율(T_{AA}), Rayleigh 산란에 의한 투과율(T_R), 에어로졸에 의한 총 산란 복사량과 전방 산란 복사량의 비율(0.84)인 B_a , 에어로졸 산란에 의한 투과율(T_{AS}), 공기의 질량(M , $g cm^{-3}$)을 고려하여 식 (8)에 의해 계산된다. 산란 일사량과 직달 일사량, 그리고 MODIS43으로부터 산출된 알베도를 이용하여 MODIS 통과시간대의 순간 일사량을

계산하였으며 식 (9)와 같다. 여기서 α 는 지표면 알베도, α_s 는 대기 알베도를 의미한다.

$$R_s \downarrow = (I_{dir} + I_{dif}) / (1 - \alpha \alpha_s) \quad (9)$$

MODIS 대기 자료로부터 산출한 일사량은 위성이 지나가는 순간의 일사량이다. Bisht *et al.* (2005)에 의해 제안된 Sinusoidal model을 사용하여 맑은 날에 대한 순간 일사량을 일 단위로 확장하여 추정하였다.

$$R_s(t) = R_{s,max} \times \sin\left[\left(\frac{t - t_{rise}}{t_{set} - t_{rise}}\right)\pi\right] \quad (10)$$

위 식 (10)에서 $R_{s,max}$ 는 일 최대 일사량, t_{rise} 와 t_{set} 는 각각 일출, 일몰시각(Local sunrise and sunset time)을 의미한다. 일 최대 일사량($R_{s,max}$)과 일 평균 일사량(Daily Average Shortwave Radiation, DASR)은 연구지역에 대한 순간 일사량과, 위성통과시간을 통해 계산할 수 있으며 식 (11)과 식 (12)에 각각 나타내었다.

$$R_{s,max} = \frac{ISR}{\pi \sin\left[\left(\frac{t_{overpass} - t_{rise}}{t_{set} - t_{rise}}\right)\pi\right]} \quad (11)$$

$$DASR = \frac{\int_{t_{set}}^{t_{rise}} R_s(t) dt}{\int_{t_{set}}^{t_{rise}} dt} = \frac{2R_{s,max}}{\pi} = \pi \sin\left[\left(\frac{t_{overpass} - t_{rise}}{t_{set} - t_{rise}}\right)\pi\right] \quad (12)$$

위 식 (11)에서, ISR은 위성 통과 시점에 순간적으로 추정된 일사량(Instantaneous shortwave Radiation), $t_{overpass}$ 는 연구지역에 대한 MODIS 위성 통과 시간을 의미한다. 이렇게 구해진 DASR에 낮 길이를 적용하면 일 단위 일사량을 산출할 수 있다. 일 단위로 확장하는데 있어서 중요한 것이 낮의 길이를 산출하는 것이다. 본 연구에서는 Dingman (1994)이 제안한 방법을 이용하여 일출(t_{rise})과 일몰시각(t_{set})을 구하고, 그 두 값의 차이로 낮의 길이(Day length)를 식 (13)에서 식 (18)을 이용하여 계산하였다.

$$\Gamma = \frac{2\pi \times (J - 1)}{365} \quad (13)$$

Γ 는 Day angle을 의미하며, J는 연중 일 값(Day number of the year)을 의미한다.

$$\delta = \frac{180}{\pi} \times \left[\begin{aligned} & [0.006918 - 0.39912 \cos(\Gamma) + 0.070257 \sin(\Gamma)] \\ & - 0.006758 \cos(2\Gamma) + 0.000907 \sin(2\Gamma) \\ & - 0.002697 \cos(3\Gamma) + 0.00148 \sin(3\Gamma) \end{aligned} \right] \quad (14)$$

$$\theta = \cos^{-1}[\sin(\Lambda) \cdot \sin(\delta) + \cos(\Lambda) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega \cdot t)] \quad (15)$$

$$T_{hr} = - \frac{\cos^{-1}[-\tan(\delta) \cdot \tan(\Lambda)]}{\omega} \quad (16)$$

$$T_{hs} = + \frac{\cos^{-1}[-\tan(\delta) \cdot \tan(\Lambda)]}{\omega} \quad (17)$$

$$\text{Day length} = T_{hs} - T_{hr} \quad (18)$$

식 (14)으로부터 태양 적위(δ , Degree)를 계산한다. 태양 천정각(θ , zenith angle)을 식 (15)를 이용하여 계산하고 그로부터 일출, 일몰시간을 각각 식 (16)과 식 (17)에 의해 계산할 수 있다. Λ 는 위도이며 $\omega \cdot t = 0$ 일 때, 정오를 의미한다.

3. 결과

MODIS 자료로부터 추정한 일차생산성 알고리즘 기상입력자료와 플렉스 타워의 지상관측자료를 비교하여 신뢰도를 평가하였다. 추정된 기상입력자료를 평가하기 위한 오차분석 방법으로 평균 오차(Mean Error, ME)와 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE), 상관계수(R)를 사용하였다.

MODIS 위성영상을 이용하여 추정한 일 최저기온과 관측자료로부터 얻은 일 최저기온을 각각의 플렉스 타워에 대해 비교한 결과 상관계수가 0.83에서 0.98의 범위의 양호한 상관성을 보였다(Table 3). ARM는 모든 연구기간에 대해서 상관계수가 0.94에서 0.97의 범위를 보였고, ME값은 +1.9°C에서 +3.2°C까지로 MODIS 기온이 높게 나타나는 경향을 보였다. RMSE는 3.4°C에서 4.6°C의 값을 가졌다. ARM과 함께 Bo1, Ne1 지역도 역시 높은 상관계수와 양호한 일치도를 보였다. 전체적인 결과 중에서 가장 낮은 상관관계를 보인 Ne1의 2006년의 경우, 적은 자료 개수(N=64)에 의한 영향으로 생각된다. 2005년 IB1과 2004년 IB2은 자료의 개수가 적음에도 높은 상관계수를 보였다. MOz의 경우 2006년에 ME값이 -0.9로 MODIS값이 약간 과소평가

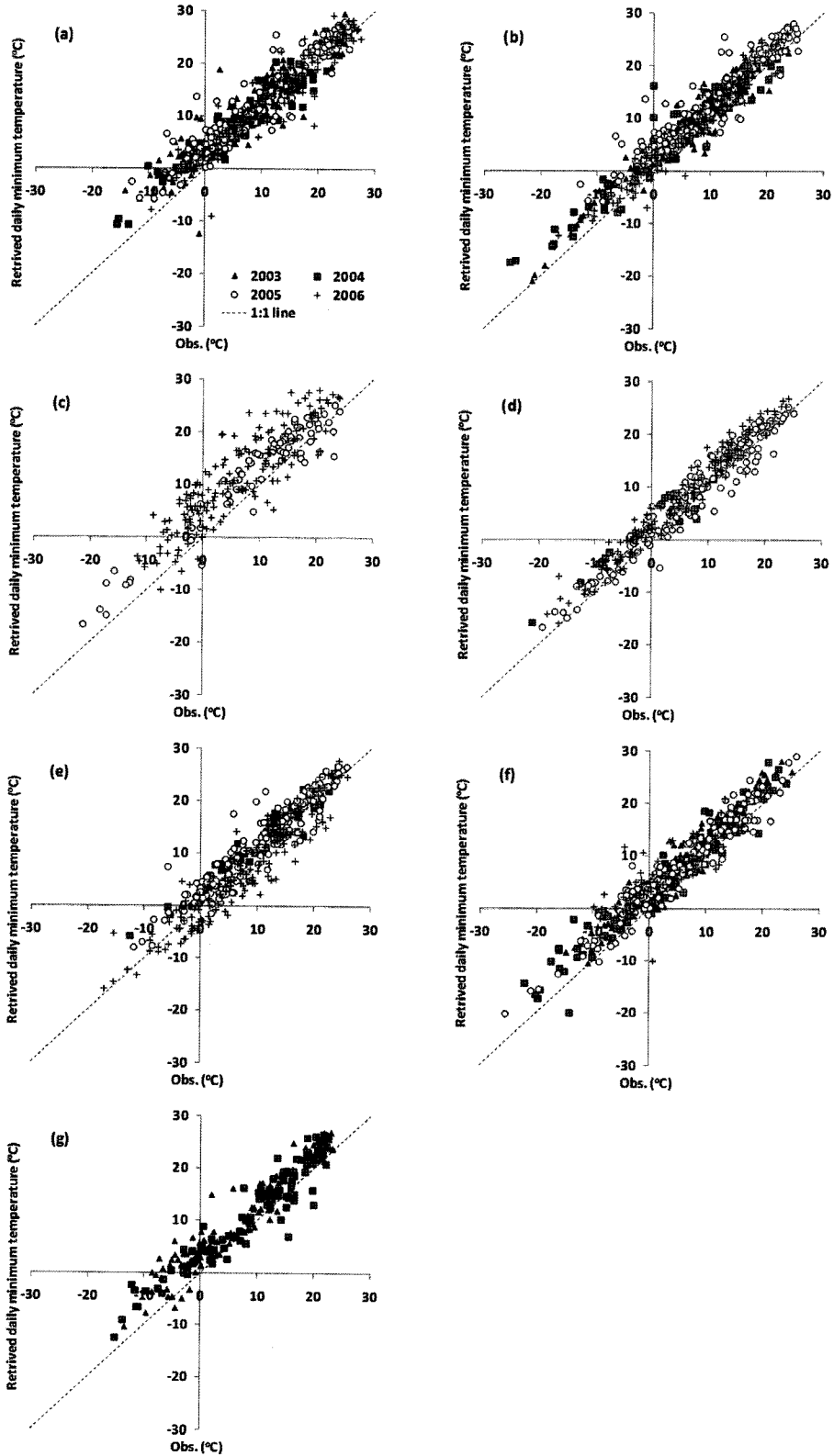


Fig. 1. Scatter plots between the MODIS-derived daily min temperature and measured daily min temperature(a: ARM, b: Bo1, c: IB1, d: IB2, e: MOz, f: Ne1, g: Wlr).

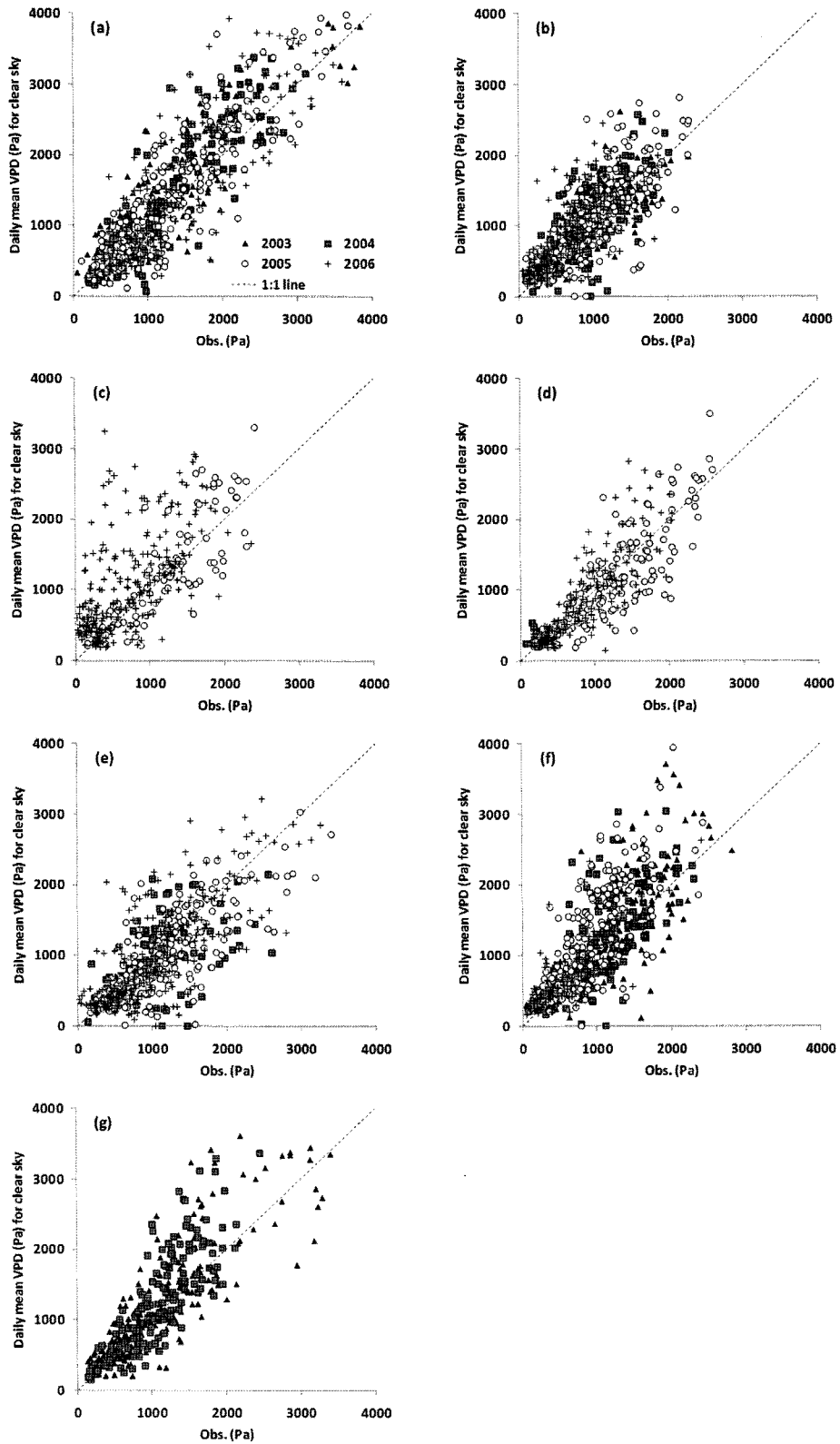


Fig. 2. Scatter plots between the MODIS-derived daily mean VPD and measured daily mean VPD(a: ARM, b: Bo1, c: IB1, d: IB2, e: MOZ, f: Ne1, g: Wlr).

Table 3. Error Statistics for MODIS daily min temperature and daily min temperature at flux sites

site	year	Ta(°C)			
		N	ME	RMSE	R
ARM	2003	160	+3.2	4.6	0.94
	2004	153	+2.5	3.6	0.97
	2005	160	+3.0	4.3	0.95
	2006	143	+1.9	3.4	0.96
BO1	2003	135	+2.0	3.2	0.96
	2004	129	+2.2	3.5	0.97
	2005	134	+1.3	3.3	0.94
	2006	134	+1.6	2.8	0.97
Ne1	2003	153	+2.9	3.7	0.97
	2004	147	+2.7	3.7	0.97
	2005	160	+2.8	3.7	0.97
	2006	64	+4.0	5.7	0.83
Wlr	2003	109	+3.4	4.4	0.96
	2004	109	+2.4	3.7	0.96
	2005	-	-	-	-
	2006	-	-	-	-
IB1	2003	-	-	-	-
	2004	-	-	-	-
	2005	81	+3.0	4.3	0.96
	2006	160	+5.2	6.9	0.87
IB2	2003	-	-	-	-
	2004	23	+3.0	3.9	0.95
	2005	154	+1.1	2.7	0.97
	2006	162	+2.5	3.3	0.98
MOz	2003	-	-	-	-
	2004	81	+1.6	2.6	0.96
	2005	152	+1.2	3.2	0.94
	2006	152	-0.9	3.3	0.95

하는 결과를 보였다. 그러나 대부분의 지역에서 MODIS가 약간 과소평가하는 경향을 보이며 1:1 대응선에 선형적으로 잘 맞는 결과를 나타냈으며(Fig. 1), ME와 RMSE는 각각 -0.9°C에서 5.2°C, 2.6°C에서 5.7°C의 범위를 보였다.

VPD는 2006년 IB1와 2004년 MOz을 제외한 모든 지역에서 MODIS가 약간 과대평가하며 1:1 대응선을 중심으로 산개하는 경향을 보이지만 유의한 일치도를 보였다. 전체적으로 VPD가 값이 낮을 때는 MODIS가 과소평가하는 경향을 보였으며, 값이 높아질수록 점점 MODIS가 과대평가되는 경향을 보이고 있다(Fig. 2). 2004년 IB2(R=0.24, N=15)을 제외한 지역에서 상관계

Table 4. Error Statistics for MODIS daytime mean VPD and daytime mean VPD at flux sites

site	year	VPD (Pa)			
		N	ME	RMSE	R
ARM	2003	190	+128.0	431.9	0.92
	2004	208	+115.3	404.7	0.91
	2005	214	+79.4	439	0.89
	2006	175	+144.2	588.6	0.85
BO1	2003	178	+88.3	322.5	0.8
	2004	160	+96.9	372.6	0.77
	2005	184	+70.2	417.6	0.78
	2006	174	+163.1	409.6	0.72
Ne1	2003	186	+133.8	514.3	0.79
	2004	174	+107.2	436	0.76
	2005	173	+338.0	628.1	0.73
	2006	82	+130.3	356.7	0.78
Wlr	2003	195	+140.1	478.7	0.85
	2004	166	+177.2	456.8	0.82
	2005	-	-	-	-
	2006	-	-	-	-
IB1	2003	-	-	-	-
	2004	-	-	-	-
	2005	88	+21.2	417.6	0.83
	2006	229	+382.1	686.6	0.6
IB2	2003	-	-	-	-
	2004	15	+120.2	174.8	0.24
	2005	152	-97.3	389.8	0.85
	2006	160	+25.7	343.3	0.83
MOz	2003	-	-	-	-
	2004	107	-120.2	516.5	0.51
	2005	218	-183.8	430.8	0.81
	2006	235	-46.1	483.2	0.77

수는 0.51에서 0.92의 범위를 보이며, ME와 RMSE는 각각 -183.8 Pa에서 382.1 Pa, 174.8 Pa에서 686.6 Pa의 값의 범위를 보인다(Table 4).

일 단위 일사량(Daily Shortwave radiation)은 2004년 Wlr을 제외한 모든 지역에서 MODIS가 약간 과대평가하는 경향을 보였지만 대부분의 지역에서 지상 관측자료와 유의한 일치도를 보였다(Table 5). 2004년 IB2(R=0.12)을 제외한 지역에서 상관계수가 0.67에서 0.98로 나타났다. ME는 -0.4 MJ day⁻¹에서 +7.9 MJ day⁻¹, RMSE는 2.0 MJ day⁻¹에서 10.3 MJ day⁻¹의 범위를 나타내었다. 2006년 IB1의 경우 실측자료에 대해 MODIS가 매우 과대평가하며 산개하는 경향을 보였

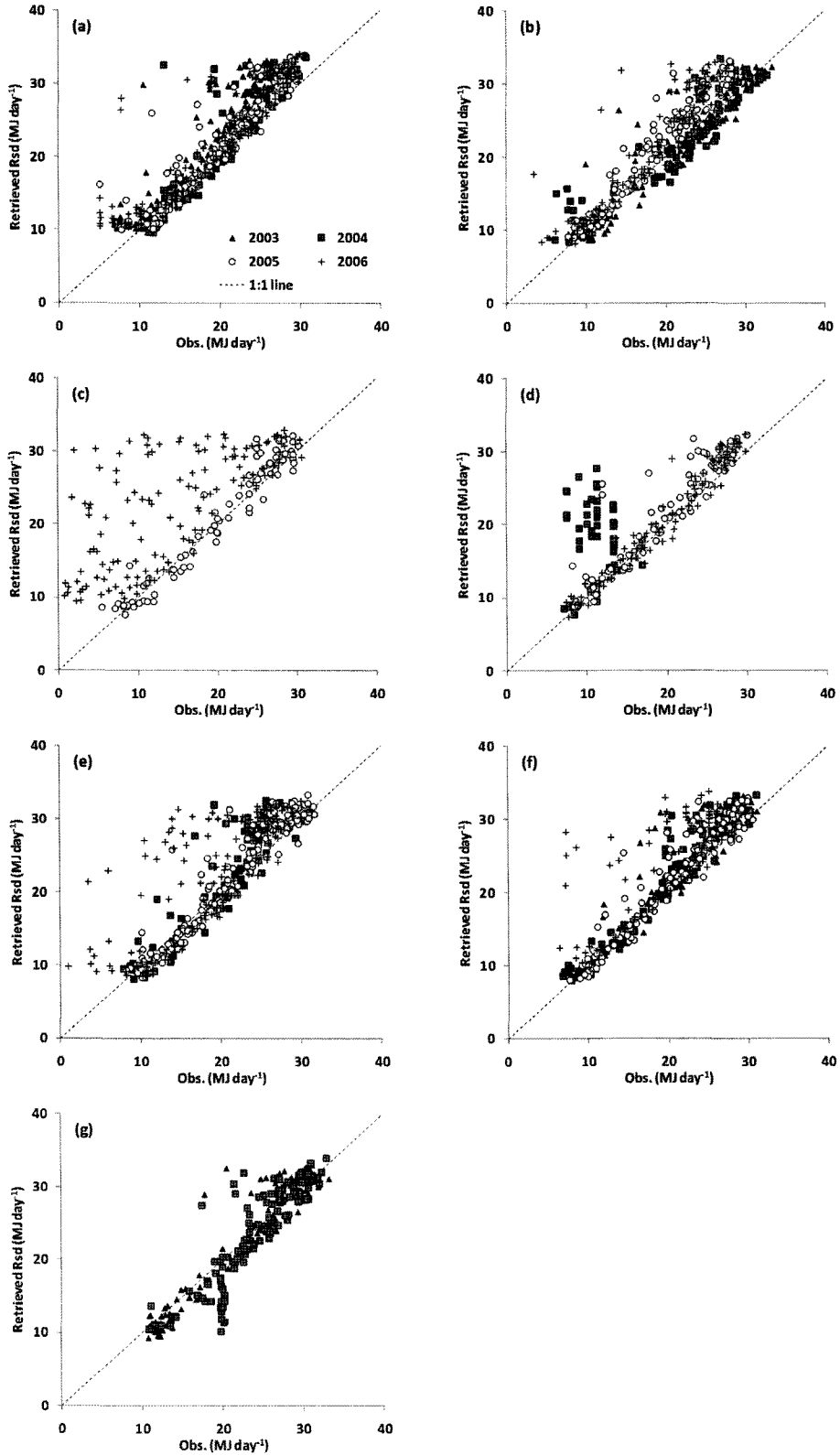


Fig. 3. Scatter plots between the MODIS-derived daily shortwave radiation and measured daily shortwave radiation(a: ARM, b: Bo1, c: IB1, d: IB2, e: MOZ, f: Ne1, g: Wlr).

Table 5. Error Statistics for MODIS daily shortwave radiation and daily shortwave radiation at flux sites

site	year	Shortwave Radiation (MJday ⁻¹)			
		N	ME	RMSE	R
ARM	2003	124	+3.3	4.6	0.93
	2004	146	+1.4	3.3	0.93
	2005	138	+1.9	3.2	0.94
	2006	140	+2.4	4.1	0.91
BOI	2003	113	+0.3	2.7	0.94
	2004	94	+0.5	2.8	0.93
	2005	100	+2.4	3.2	0.96
	2006	102	+3.3	4.7	0.9
Ne1	2003	144	+1.7	2.9	0.96
	2004	129	+1.5	2.6	0.97
	2005	127	+1.5	2.8	0.96
	2006	69	+4.9	7	0.73
Wlr	2003	107	+0.3	2.6	0.96
	2004	134	-0.4	3	0.9
	2005	-	-	-	-
	2006	-	-	-	-
IB1	2003	-	-	-	-
	2004	-	-	-	-
	2005	78	+0.7	2.1	0.97
	2006	136	+7.91	0.3	0.67
IB2	2003	-	-	-	-
	2004	52	+6.1	8.3	0.12
	2005	82	+1.8	3.2	0.93
	2006	99	+1.0	2	0.98
MOz	2003	-	-	-	-
	2004	106	+1.6	3.6	0.92
	2005	135	+0.7	2.4	0.96
	2006	123	+3.6	6.4	0.76

다. 2004년 IB2은 획득한 관측자료의 개수가 54개로 매우 적음을 확인하였다(Fig. 3).

4. 토의 및 결론

이 연구에서는 MODIS 위성 영상 자료를 이용하여 MODIS 기반의 생산성을 추정하기 위한 입력자료를 추정하고, 이를 지상관측자료와 비교하여 신뢰도 평가를 하였다. MODIS GPP 알고리즘에 이용되는 DAO 기상 입력자료는 해상도가 매우 거칠기 때문에 광역지역에 관한 지표의 기상이질성을 표현하기에 어려움이 있다.

선행연구에서 DAO 기상입력자료를 이용한 MODIS GPP는 지상관측 기상자료를 사용한 경우에 비해 최대 25%의 과대평가경향을 나타내며, 광역지역의 정교한 생산성 추정을 위해서는 보다 더 상세한 공간 해상도의 기상자료를 이용할 필요가 있다고 보고하였다(강신규 외, 2005). MODIS 대기자료로부터 추정된 기상입력자료의 경우 5 km의 공간 해상도로 DAO 기상입력자료에 비해 500배 높은 상세한 지표기상자료를 제공하므로, 지표기상의 공간 이질성을 좀 더 효과적으로 표현할 수 있다. 이 연구에서 MODIS 대기자료를 이용한 LUE 모형의 기상입력자료, 즉 일 최저기온, 낮 시간 평균 VPD, 일 단위 일사량을 생산하고 플럭스 관측 연구지의 측정자료와 비교한 결과 상당히 우수한 일치도를 보임을 알 수 있었다.

연구지역에 대해 MODIS는 하루 동안 밤과 낮에 각각 두 번, 총 네 번의 영상자료를 제공한다. 하지만 위성 영상으로부터 얻을 수 있는 자료는 30분마다 주기적으로 관측하는 지상관측자료와 비교하여 자료의 개수가 제한적이다. 하루 동안 네 번의 관측으로부터 일 최저기온을 추정하기 위해 새벽 1시 30분경에 상공을 통과하는 Aqua MODIS의 기온자료를 일 최저기온으로 사용할 수 있는지를 평가하였다. 새벽 1시 30분경에 통과하는 Aqua MODIS의 기온자료를 관측한 일 최저기온과 비교한 결과, MODIS의 일 최저기온이 다소 높게 나타나는 측면이 있지만(ME = +2.4°C), 상당히 유의한 일치도를 보였다(Fig. 1). 이는 MODIS 기온자료를 일 최저기온 자료로 대체함이 가능하다는 것을 보여준다. 추정값과 관측값 간의 상관계수가 0.83에서 0.98로 높은 상관성을 보였다. MODIS에서 추정한 일 최저기온이 관측한 최저기온보다 높은 것은 흔히 하루 중 기온이 가장 낮은 시점은 해 뜨기 직전으로, 밤 중에 기온이 지속적으로 낮아지기 때문이다. 대기가 습한 날에는 밤 중에 수증기가 응결되면서 잠열을 방출하기 때문에 새벽 기간대의 기온 하강이 정체되는 경우도 있다. 그러나 일반적으로 새벽 1시 반경의 기온은 일출 직전의 기온보다 높은 경향이 있다. 이 연구의 결과는 이러한 일반적인 밤 중의 기온변화 추세를 반영한 것이다.

한편 몇몇 연구자들이 MODIS의 지표 기온값을 관측자료와 비교한 결과를 보고하였다. 그러나 이들 연구는 MODIS 통과 시간대의 관측값과 비교한 것이므로, 이

연구에서 수행한 일 최저기온을 평가한 것과는 차이가 있다. 아시아 플럭스 관측 네트워크(AsiaFlux Network)로부터 획득한 자료에 대해 MODIS로부터 추정된 기온을 비교 분석한 다른 연구의 결과에 따르면 ME가 -5.6°C 에서 1.1°C (정승택 외, 2009), -1.5°C 에서 -0.4°C (Jang *et al.*, 2010)의 범위를 각각 제시하였다. 또한 Bisht *et al.* (2005)의 연구에서는 미국 남부 대평원에서 MODIS 기온과의 오차가 5.01°C 라고 보고하였으며, Ryu *et al.* (2008)은 Terra와 Aqua위성으로부터 기온을 산출하여 지상관측자료와 비교한 결과 RMSE가 각각 2.9°C 과 2.6°C 라고 보고하였다. 일 최저기온에 대해 기존 위성영상 기반의 기상자료추정 연구결과와 지상관측자료를 비교하였을 때, 유사한 오차의 범위이거나 더 작은 오차범위를 나타내어 신뢰할 만한 수준의 결과를 나타내었음을 확인하였다.

낮 시간 평균 VPD는 MODIS07 대기 프로파일로부터 제공되는 기온과 이슬점 온도를 이용하여 계산하였다. 이 연구에서 낮 시간 평균 VPD를 추정하기 위한 세 가지 대안적인 자료를 평가하였다: Terra 영상으로부터 추정된 VPD, Aqua 영상으로부터 추정된 VPD, Terra와 Aqua영상의 VPD를 평균한 VPD. 세 가지 대안적 VPD 자료를 평가한 결과, Aqua영상만을 이용하거나 Terra영상만을 이용하여 추정한 VPD보다 두 영상을 병합한 VPD의 오차가 상대적으로 적었으며(ME = 91.5 kPa), 대부분 0.7 이상의 높은 상관계수를 보였다 (Table 4). 이는 일반적으로 VPD가 오전에 낮은 값을, 오후에 높은 값을 보이는 경향이 있어, 이 두 시간대의 VPD를 평균함으로써 낮 시간 평균 VPD에 근접한 값을 추정할 수 있음을 알려준다. 따라서 이 연구는 오전 10시 30분경에 통과하는 Aqua자료와 오후 1시 30분경에 통과하는 Terra자료를 병합하여 낮 시간 평균 VPD의 추정이 가능함을 보였다. Jang *et al.* (2010)의 연구에 따르면 VPD는 ME가 -0.2223 KPa에서 $+0.007$ KPa의 범위를 보이고, 정승택 외(2009)의 연구에서는 -0.53 KPa 에서 $+0.39$ KPa의 범위를 보였다. 다른 연구에서 제시한 오차와 비교하였을 때 오차의 범위가 유사함을 확인하였고, Terra와 Aqua MODIS 자료를 병합하여 추정한 낮 시간 평균 VPD는 단일위성으로부터 추정된 결과보다 더 향상된 예측력을 보임을 확인하였다.

한편, Jang *et al.* (2010)이 제안한 방법에 따라

MODIS로부터 일 단위 일사량을 추정하였고, 관측값과 비교한 결과 미국 지역에 대해서도 유의한 예측력을 보임을 확인하였다(ME= -0.4 MJ day $^{-1}$ ~ $+7.9$ MJ day $^{-1}$; R = 0.67~0.97).

결과적으로 MODIS 위성영상으로부터 LUE 모형의 생산성 추정에 사용되는 기상입력자료를 추정한 결과, 지상기반의 관측자료와 매우 우수한 일치도를 보임을 확인하였다. 이 기법을 이용하여 현재 NASA MODIS가 제공하는 일차생산성 자료의 거친 기상자료 공간해상도의 문제를 개선하여, 보다 상세한 지표 기상 이질성을 반영한 일차생산성 자료를 생산할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 이 연구의 방법은 맑은 날에 대해서만 적용되는 한계가 있다. 특히 국내의 경우 미국 중서부지대에 비해서 하계의 강수일이 많은 몬순지역이기 때문에 우리나라의 농경지에 적용할 경우 구름의 영향으로 영상의 결측이 생기거나 자료의 신뢰도가 낮은 문제점이 예상된다. 또한 우리나라의 경우 플럭스 타워의 부족, 토지피복 복잡성에 의한 공간적 이질성 문제로 국내 연구의 적용에는 어려움이 따른다. 향후 구름 낀 날에 대한 MODIS 기반의 기상자료 추정기법 개발에 대한 후속 연구와 국내 연구대상지에 적용할 수 있는 생산성 알고리즘의 개발이 필요하다고 사료된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ0077532011)의 지원에 의해 이루어진 것임.

참고문헌

- 김이현, 홍석영, 이훈열, 이재은, 2011. L, C, X-밴드 레이다 산란계 자동측정시스템을 이용한 콩 생육 모니터링, 대한원격탐사학회지, 27(5): 191-201.
- 강신규, 김영일, 김영진, 2005. MODIS 총 일차생산성 산출물의 오차요인 분석: 입력기상자료의 영향, 한국농림기상학회지, 7(2): 171-183.
- 정승택, 장근창, 강신규, 김준, H. Kondo, J. Asanuma, M. Gamo, N. Saigusa, S. Wang, and S.

- Han, 2009. 동아시아 지역의 플릭스 타워 관측지에 대한 MODIS 위성영상 기반의 증발산 평가, 한국농림기상학회지, 11(4): 174-184.
- Bird, R. E. and R. L. Hulstrom, 1981. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces, Solar Energy Research Inst., Golden, USA.
- Bisht, G., V. Venturini, S. Islam, and L. Jiang, 2005. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days, *Remote Sensing of Environment*, 97(1): 52-67.
- Dingman, S. L., 1994. Physical hydrology 2nd Edition, Prentice-Hall Inc., New Jersey 07458.
- Field, C. B., J. T. Randerson, and C. M. Malmström, 1995. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, 51(1): 74-88.
- Gitelson, A. A., A. Vina, S. B. Verma, D. C. Rundquist, T. J. Arkebauer, G. P. Keydan, B. Leavitt, V. Ciganda, G. G. Burba, and A. E. Suyker, 2006. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity, *Journal of Geophysical Research*, 111: D08S11.
- Heinsch, F. A., M. Reeves, P. Votava, S. Kang, C. Milesi, M. Zhao, J. Glassy, W. M. Jolly, R. Loehman, C. F. Bowker, J. S. Kimball, R. R. Nemani, and S. W. Running, 2003. User's guide, GPP and NPP (MOD17A2/A3) products NASA MODIS Land Algorithm, Missoula, MT: The University of Montana.
- Jang, K., S. Kang, J. Kim, C. Lee, T. Kim, J. Kim, R. Hirata, and N. Saigusa, 2010. Mapping evapotranspiration using MODIS and MM5 Four-Dimensional Data Assimilation, *Remote Sensing of Environment*, 114(3): 657-673.
- Monteith, J. L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 281(980): 277-294.
- Prince, S. D. and S. N. Goward, 1995. Global primary production: a remote sensing approach, *Journal of Biogeography*, 22: 815-835.
- Ryu, Y., S. Kang, S. Moon, and J. Kim, 2008. Evaluation of land surface radiation balance derived from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) over complex terrain and heterogeneous landscape on clear sky days, *Agriculture and forest meteorology*, 148(10): 1538-1552.
- Running, S. W., P. E. Thornton, R. R. Nemani, and J. Glassy, 2000. Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System, *Methods in Ecosystem Science*, Springer-Verlag, NY, 44-57.
- Seemann, S. W., J. Li, W. P. Menzel, and L. E. Gumley, 2003. Operational retrieval of atmospheric temperature, moisture, and ozone from MODIS Infrared radiations, *Journal of Applied Meteorology*, 42: 1072-1091.
- Turner, D. P., S. Urbanski, D. Bremer, S. C. Wofsy, T. Meyers, S. T. Gower, and M. Gregory, 2003. A cross-biome comparison of daily light-use efficiency for gross primary production, *Global Change Biology*, 9(3): 383-395.