

MODIS 엽면적지수 및 일차생산성 영상의 구름 영향 오차 분석: 우리나라 몬순기후의 영향

강 신 규

강원대학교 자연대학 환경과학과

Analysis on Cloud-Originated Errors of MODIS Leaf Area Index and Primary Production Images: Effect of Monsoon Climate in Korea

Kang, Sinkyu

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

ABSTRACT: MODIS (Moderate Resolution Image Spectrometer) is a core satellite sensor boarded on Terra and Aqua satellite of NASA Earth Observing System since 1999 and 2001, respectively. MODIS LAI, FPAR, and GPP provide useful means to monitor plant phenology and material cycles in terrestrial ecosystems. In this study, LAI, FPAR, and GPP in Korea were evaluated and errors associated with cloud contamination on MODIS pixels were eliminated for years 2001~2003. Three-year means of cloud-corrected annual GPP were 1836, 1369, and 1460 $g\ C\ m^{-2}\ y^{-1}$ for evergreen needleleaf forest, deciduous broadleaf forest, and mixed forest, respectively. The cloud-originated errors were 8.5%, 13.1%, and 8.4% for FPAR, LAI, and GPP, respectively. Summertime errors from June to September explained by 78% of the annual accumulative errors in GPP. This study indicates that cloud-originated errors should be mitigated for practical use of MODIS vegetation products to monitor seasonal and annual changes in plant phenology and vegetation production in Korea.

Key words: Cloud contamination, MODIS, Plant phenology, Primary production

서 론

육상식생은 대기-식생-토양간 물질순환 과정의 속도와 양을 조절하는 중요한 생태계 요소이다. 지구 기후 변화와 날로 증가하는 대기 중 이산화탄소 농도의 변화에 따라 육상 식생의 물질 순환 조절 기능에 변화의 징후들이 나타나고 있으며, 따라서 전 지구적 규모의 지속적 육상생태계 모니터링 기법들이 개발되기에 이르렀다(Prince and Goward 1995, Running *et al.* 1999). 전 지구 규모의 육상, 대기 및 해양환경의 변화를 모니터링하기 위한 목적으로 미국 항공우주국(NASA)에서 개발한 지구관측시스템(EOS, Earth Observing System)은 그 대표적인 예라 하겠다(Running *et al.* 1994). EOS 프로그램에 의해 1999년과 2001년에 발사된 Terra와 Aqua 인공위성에 탑재된 MODIS (Moderate Resolution Image Spectrometer)는 EOS의 핵심 원격 탐사 센서로서, 미국 항공우주국은 육상 생태계의 물질순환 모니터링을 위해 8일 간격의 엽면적지수(LAI, Leaf Area Index), 광합성 유효 복사량 중 식생에 흡수된 비율(FPAR, Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation), 총일차생산성(GPP, Gross Primary Production) 영상 등을 제공하고 있으며, 현재 세

계 유수의 연구진들에 의해 MODIS 영상의 신뢰도 평가가 진행 중에 있다(Cohen and Justice 1999, Morisette *et al.* 2002, Myneni *et al.* 2002, Turner *et al.* 2003).

LAI, FPAR, GPP 등은 식생 성장의 계절 변화와 연 변화를 모니터링하는 데에 주요한 정보를 제공하는데, 한국을 비롯한 온대지방에서는 일반적으로 겨울철에 낮고 여름철에 높은 계절 변화를 보인다. Kang 등(2003)의 분석에 의하면 우리나라에 대한 MODIS LAI 영상은 위와 같은 계절 패턴을 잘 따르는 것으로 나타났으며, MODIS에 의한 LAI 시계열 자료를 이용하여 개엽/낙엽시기와 성장기간의 연 변화를 성공적으로 탐지할 수 있음을 보였다. 따라서 MODIS 영상은 향후 우리나라 전역의 식물 계절학 및 육상 생태계 물질 순환 모니터링을 위한 새로운 기법을 제공하리라 예상되며, 특히 지역 규모에서 나타나는 생태계 물질순환의 공간적 이질성에 대해 현재 1 km, 향후 250 m 해상도의 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

하지만 MODIS 영상에 구름 혹은 눈 등이 존재하는 것으로 판별된 경우, MODIS LAI, FPAR, GPP는 신뢰성 없는 값을 보이게 되는데, 이는 이들 영상의 추정에 사용되는 MODIS 가시광선~적외선 구간의 지표면 반사도(surface reflectance)가 식생 표면의 반사도가 아닌 구름 상층부의 반사도를 의미하기 때문이

* Corresponding author; Phone: +82-33-250-8578, e-mail: kangsk@kangwon.ac.kr

다. 즉 가시광선과 적외선은 구름을 투과하지 못하며, 따라서 구름 밑의 지표에 대한 반사 정보를 제공하지 못한다. 따라서 MODIS 영상에서 구름에 오염된 픽셀의 경우 LAI, FPAR, GPP 자료를 사용해서는 안되며, 자료의 결손으로 간주해야 한다. 이처럼 구름에 의한 영상자료의 결손은 특히 몬순 기후의 영향으로 여름철 운량이 상당한 우리나라의 경우 MODIS를 이용해 식생의 계절 변화, 생태계 물질 순환을 모니터링하는 데에 심각한 문제를 야기하게 된다.

최근에 MODIS LAI, FPAR, GPP 영상의 구름에 의한 자료 결손을 해결하기 위한 기법들이 개발되었다(Kang et al. 2005, Zhao et al. 2005). 이들의 방법은 모두 유사하게 구름에 의한 자료 결손이 발생한 경우, 전후 시기의 자료를 이용해 내삽하거나 혹은 주변의 구름 없는 픽셀 자료를 이용해 내삽하는 기법을 사용한다. 특히 Kang 등(2005)은 MODIS 자료의 사용자가 손쉽게 구름에 의한 LAI, FPAR, GPP 자료 결손을 내삽할 수 있는 알고리즘을 제공하였으며, 이를 이용해 MODIS GPP의 구름 영향을 감쇄한 결과 구름 영향 감쇄 전과 비교하여 미국 북서부 지역의 연간 GPP가 약 10 퍼센트 가량 증가하는 결과를 보였다. 건조한 여름과 습한 겨울 기후를 보이는 미국 북서부 지역과 비교하여, 우리나라는 몬순 기후의 영향으로 활발한 광합성 기간인 여름철에 운량이 증가하기 때문에 연간 GPP에 대한 구름 영향이 보다 심각할 것으로 예상된다. 따라서 향후 MODIS의 LAI, GPP 영상 등을 우리나라 육상 생태계 변화 모니터링에 응용하기 위해선 무엇보다도 몬순 기후가 MODIS 영상의 오차에 미치는 영향을 평가할 필요가 있다고 보여진다.

본 연구에서 몬순 기후를 가진 우리나라를 대상으로 MODIS LAI, FPAR, GPP 영상의 구름에 의한 오차를 평가하고, 오차량과 몬순 기후와의 관계를 조사하였다. 이를 위해 2001~2003년간 8일 간격의 MODIS LAI, FPAR, GPP 영상자료에 대해 Kang 등(2005)의 방법을 이용해 구름 영향을 감쇄한 영상을 제작하였으며, 이를 이용해 식생형에 따른 엽면적지수와 총 일차 생산성의 차이 등을 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 우리나라 육상 생태계의 식물 계절학 및 물질 순환 모니터링을 위한 MODIS LAI, GPP 영상의 전처리 기법을 수립하는 데에 기여할 것으로 기대된다.

재료 및 방법

MODIS LAI, FPAR, GPP 영상

미국항공우주국은 1 km 공간해상도와 8일 단위 시간해상도의 MODIS LAI, FPAR, GPP 영상을 제공한다. MODIS LAI, FPAR 영상은 기본적으로 일 단위로 계산되지만, 구름 영향을 감쇄하기 위하여 이를 각 년도의 1월 1일부터 시작하는 8일 단위의 기간으로 묶은 후 각 기간의 최대값을 8일 단위의 대표값으로 기록한 영상으로 제공된다. 한편 MODIS GPP 영상은 8일 단위의 최대 FPAR 값과 일 단위의 기상자료를 이용하여 일 단위의 GPP를 계산한 후 이를 8일 단위의 누적 GPP로 변환한 값

이다. MODIS GPP에 대한 자세한 설명은 Heinsch 등(2003)에서, LAI와 FPAR에 대한 설명은 Myneni 등(2002)을 참조하기 바란다.

전통적으로 인공위성 자료로부터 계산한 식생지수 영상에서 구름에 의한 오염을 감쇄하는 방법으로 일정 기간의 위성영상을 중첩하여 최대값을 추출한 후 그 기간의 대표값으로 추정하는 방법이 널리 사용되어왔다. 이는 많은 식생지수에서 구름의 존재는 식생지수값을 감소시키는 쪽으로 영향을 미치기 때문이다. MODIS의 8일 단위 LAI, FPAR 영상은 위와 같은 전통적인 구름 영향 감쇄 기법을 채택하였다. 하지만 8일 내내 구름이 존재하는 경우엔 위와 같은 중첩기법으로 구름 영향을 완전히 제거할 수 없게 된다. 따라서 MODIS LAI, FPAR 영상은 8일간 중첩영상에서 구름의 존재 여부를 지시하는 부가적인 정보를 제공함으로써, 사용자가 구름 영향의 정도를 인지하여 영상의 사용에 주의를 기울일 것을 권장하고 있다.

MODIS 영상의 각 픽셀에 대해 자료질을 평가한 부가적인 정보는 quality control (QC) flag이라는 별도의 영상으로 주어지는데, 이는 0에서 255까지의 8비트(bit) 정수로 표현된다. 각각의 비트 값은 센서의 오작동 여부, 구름의 존재 여부, 계산에 사용된 알고리즘의 종류 등에 대한 정보를 담고 있다(Myneni et al. 2002). 일례로 FPAR, LAI, GPP의 QC Flag에서 [0, 1, 32, 33, 64, 65, 96, 97] 이외의 값은 어떠한 형태로든 구름에 의해 픽셀이 오염되었음을 알려준다. 일례로 아래의 Fig. 1은 울산과 대관령 기상대 주변의 5 km × 5 km 격자의 값을 평균한 2001년도 LAI 시계열곡선으로 7월과 8월 중에 LAI 값의 등락이 나타나는데, 이는 장마기간 중의 구름 영향으로 사료된다. 구름 영향은 이와 같이 LAI, FPAR, GPP 등을 감소시키는 비정상적인 결과를 초래하며, 따라서 구름 영향을 제거 혹은 감쇄한 영상을 제작할 필요가 있다.

MODIS LAI, FPAR, GPP 영상에서의 구름 영향 오차 감쇄기법 MODIS GPP는 식물의 복사사용효율(radiation use efficiency)

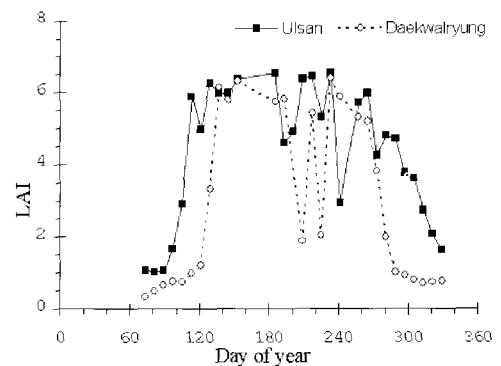


Fig. 1. Sample time series of 8-day leaf area index (LAI) from MODIS images in year 2001. The values are means of 5x5 MODIS pixels with 1 km spatial resolution around National Weather Stations in Ulsan and Daekwalryung, respectively.

에 입각한 아래의 방정식에 기초를 두고 있다. Eq. 1에서 ϵ 은 식물의 복사사용효율이며, PAR (photosynthetically active radiation)은 광합성 유효 복사량이다. 즉, 식물이 흡수한 광합성 유효 복사량이 많을수록, 식물의 복사사용효율이 높을수록, 총일차 생산성이 증가하는 방식으로 기술한다(Heinsch *et al.* 2003).

GPP 계산을 위한 PAR는 일 단위 기상자료로부터 주어지며, FPAR는 MODIS FPAR 영상을 이용한다. 따라서 FPAR가 구름에 오염된 경우, GPP 역시 구름에 오염된 결과를 보이게 된다. 구름 영향을 감쇄한 FPAR(FPAR_{adj})로 구름에 오염된 FPAR를 대치함으로써 GPP에서의 구름 영향을 감쇄할 수 있으며(GPP_{adj}), 이를 아래의 Eq. 2 및 Eq. 3과 같은 관계로 기술할 수 있다.

$$GPP = [\epsilon] \times [FPAR \cdot PAR] \quad (1)$$

$$GPP_{adj} = [\epsilon] \times [FPAR_{adj} \cdot PAR] \quad (2)$$

$$GPP_{adj} = GPP \times \frac{FPAR_{adj}}{FPAR} \quad (3)$$

본 연구에서 구름 영향을 감쇄한 LAI, FPAR 영상의 복원은 Kang 등(2005)이 제시한 시공간적 내삽기법을 이용하여 수행하였다. 이 기법은 8일 간격의 시계열 LAI, FPAR 영상에 대해 순차적으로 구름 영향을 감쇄해 가는 과정으로 아래와 같은 두 단계 과정에 의해 구름 영향을 감쇄를 시도한다. 현재 영상에서 어느 픽셀이 구름에 오염된 것으로 판별되었을 때, 우선 주변의 구름 없는 픽셀을 이용해 내삽을 시도한다. 이 과정이 실패한 경우엔 이미 구름 영향을 감쇄한 이전 시기의 동일 지점의 픽셀 값으로 현재 영상의 픽셀 값을 대치한다. 이 때 공간적인 내삽은 중심 픽셀과 동일한 토지 피복형을 가진 픽셀들만을 이용하여 수행한다. 이동격자(moving window)의 크기를 증가시키기에 따라 구름 없는 픽셀을 찾을 가능성이 높아지지만, 중심 픽셀과의 거리가 멀어져 픽셀간의 공간적 연관성이 감소하게 되므로 내삽 결과의 불확실성이 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Kang 등(2005)의 연구에서와 같이 1 km 해상도의 MODIS 자료에 대해 5 km × 5 km 크기의 이동격자를 사용하였다.

본 연구에서는 Kang 등(2005)이 논의한 바와 같이 그들의 시공간적 내삽기법이 실패할 수 있는 경우, 즉 구름이 장기간의 넓은 지역에 걸쳐 존재하는 상황에 대한 새로운 내삽규칙을 설정하였다. 위의 경우 인접한 다중의 시계열 영상에서 이동격자 내에 구름 없는 픽셀(cloud-free pixel)을 발견하기 힘들며, 이전 시기 영상의 픽셀값으로 현재 영상의 픽셀값을 대치는 경우가 시계열적으로 연달아 여러 번 발생하여 왜곡된 내삽 결과를 가져올 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최대 두 번, 즉 16일(8일×2주기)의 연이은 시간적 내삽을 허용하였고, 초과할 경우엔 현재 및 이전 영상 중 최대값을 현재 영상의 값으로 대치하도록 하였다. 다중시기 영상을 사용한다고 하여도 구름 영향을 완전히 제거하기는 어려우며 본 연구에서 사용한 기법은 구름의 영향을 최소화하기 위한 즉 구름 영향 감쇄 기법이라 하겠다.

연구대상지역의 MODIS 영상자료 수집 및 변환

본 연구의 대상지역은 우리나라를 포함하는 한반도 남단지역이다. 본 연구를 위하여 2001년부터 2003년까지의 MODIS FPAR, LAI, GPP 영상과, 2001년의 MODIS 토지 피복 영상을 준비하였다. MODIS 자료는 미국지질조사국(USGS)의 EROS 데이터베이스로부터 주문하여, 무상으로 획득하였다. MODIS LAI, FPAR, GPP 및 토지피복도 영상은 SIN이라는 지구 좌표 체계에 따라, 가로 세로 각각 1,200개의 1 km 해상도의 픽셀로 구성된 타일 단위의 HDF 파일 포맷으로 제공된다. 본 연구에서는 MRT (MODIS Reprojection Tools)라는 소프트웨어를 이용하여, SIN 지구 좌표 체계를 UTM (Zone 52) 지구 좌표 체계로, HDF 포맷을 TIFF 포맷으로 변경한 후, 변경한 파일을 Arc/Info (v. 8.012) 소프트웨어 상에서 Arc/Info 그리드 포맷으로 변환하였다. 이렇게 변환한 토지피복도, FPAR, LAI, GPP 영상에서 우리나라 지역만을 잘라낸 후, 이를 아스키(ascii) 파일로 출력하였다. 이와 같은 작업을 반복적으로 수행함으로써 2001년부터 2003년까지 각각 138개의 FPAR, LAI, GPP 영상과 2001년의 토지 피복 영상 등 총 415개 영상에 대한 우리나라 지역의 FPAR, LAI, GPP 및 토지 피복 영상 아스키 파일을 준비하였다. 아울러 구름에의 오염 여부를 확인하기 위해 LAI, FPAR 영상과 함께 제공되는 QC flag 영상을 위와 같은 과정에 따라 처리하여 총 138개 QC flag 아스키 파일을 준비하였다. 구름 영향 감쇄를 위한 알고리즘은 IDL (Interactive Data Language) 프로그래밍 언어를 사용하여 수행하였다. 우선 이동격자를 이용한 내삽법을 적용하여 FPAR, LAI 등에 나타난 구름 영향을 감쇄하였으며, 구름 영향을 감쇄한 FPAR 자료를 이용하여 Eq. 3의 방법에 따라 GPP 영상에서의 구름 영향을 감쇄하였다. MODIS 영상에서 한반도 전체를 포함하기 위해선 인접한 세 개의 MODIS 타일을 결합해야 하지만, 본 연구에서는 자료처리의 양을 줄이기 위해 하나의 타일로 온전히 표현되는 우리나라를 포함하는 한반도 남단 지역만을 연구 대상으로 삼았다. 본 연구 대상지에서 육상 지역은 1 km 해상도를 가지는 약 11만개의 픽셀을 포함한다. 향후 본 연구에서 사용한 기법을 한반도 전체로 확장하는 작업을 계획하고 있다.

분석방법

본 연구는 각 변수별로 연간 46개 3년간 총 138의 영상을 처리하며, 각 영상에서 육상지역은 약 11만개의 픽셀로 구성되어 있는 관계로, 많은 양의 자료를 다루게 된다. 따라서 가능한 한 분석내용을 단순 명료하게 표현할 필요가 있기 때문에, 공간 패턴의 분석에 있어서는 연간 대표영상만을, 시계열 패턴의 분석에서는 8일 단위의 전국 평균값을 사용하는 방식을 취하였다. 본 연구에서 LAI, FPAR의 경우는 연간 평균값 영상을 GPP의 경우는 연간 누적 GPP 영상을 각 변수의 연간 대표 영상으로 사용하였다.

구름 영향 감쇄의 효과를 분석하기 위하여 구름 영향 감쇄 후의 대표 영상과 구름 영향 감쇄 전의 대표 영상 간의 차이(구름 영향 오차)를 계산하였다. 시계열적인 변화를 보기 위하여 각

영상에서 육상에 해당하는 약 11만개 픽셀의 평균값을 계산한 후, 각 연도별로 8일 단위의 시계열 영상을 도시하였다. 구름 영향 오차를 정량화하기 위하여 각 영상의 육상지역에서 구름에 오염된 픽셀의 비율을 산출하는 방식으로 운량의 시계열 자료를 제작한 후, 운량이 각 변수의 구름 영향 오차를 얼마나 잘 설명하는가를 파악하기 위한 결정계수(r^2)를 계산하였다. 마지막으로 토지 피복 유형에 따라 구름 영향 감쇄 전과 구름 영향 감쇄 후의 LAI, FPAR, GPP 값을 비교함으로써, 토지 피복 유형에 따른 구름 영향 오차를 분석하였다.

결 과

구름 영향 오차의 시계열 특성

MODIS LAI/FPAR QC flag 영상으로부터 추정된 육상지역에서 구름에 오염된 픽셀의 비율(운량, %)은 Fig. 2와 같았다. 2001년부터 2003년까지 3년간 평균은 약 31%였으며, 2001년 27%, 2002년 31%, 2003년 35%이었다. 이 중 6월에서 9월간의 운량은 2001년 27%, 2002년 37%, 2003년 46%를 보였다. 년도에 따른 운량의 변화는 강수량의 연변화와 유사한 양상을 보였는데, 일 예로 서울기상대에서 관측한 연 강수량은 2001년 1,164 mm, 2002년 1,550 mm, 2003년 1,898 mm로 3년간 연 강수량과 연간 운량간의 결정계수는 0.999의 높은 값을 보였다. 따라서 연 강수량은 연간 운량의 변화를 설명하는 지표(indicator)로 사용할 수 있다고 보여진다.

2001~2003년간 8일 단위 우리나라 전역의 FPAR, LAI, GPP 평균의 시계열은 Fig. 3의 왼쪽 열 그림과 같다. FPAR, LAI, GPP 등은 겨울철에 낮다가 봄철에 증가하여 가을철에 다시 줄어드는 뚜렷한 계절 변화를 보여주었다. 대략 150일 정도에서 최고값에 도달하였고, 6월에서 9월간에 감소와 증가를 반복하는 양상을 보였는데, 잎이 성엽에 도달한 후 낙엽시기에 이르기까지 거의 일정한 엽면적지수를 보인다는 것을 고려할 때, 이는 구름 영향에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 3의 중간 열은 구름 영향 감쇄 알고리즘을 실행하여 구름 영향 오차를 감쇄한 결과를 보여주는 시계열 그림으로, 특히

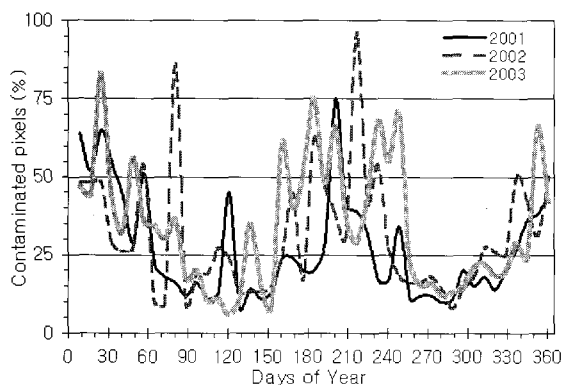


Fig. 2. Fraction (%) of pixels contaminated with cloud cover for years 2001~2003.

FPAR, LAI 시계열이 여름철에 최고값 수준에서 안정화되는 합리적인 패턴을 복원할 수 있었다. 반면에 구름 영향 오차를 감쇄한 GPP 시계열은 구름 영향 감쇄 전에 비해 다소 등락의 폭이 줄어들었지만, 여전히 최고값에 도달한 후에 상당한 등락을 보이며 서서히 감소하는 경향을 보였다. 이는 여름철 FPAR, LAI 등이 일정한 수준에서 유지되더라도, 운량에 따른 일사량 및 기온의 변화가 GPP에 영향을 미치기 때문이라고 사료된다. 즉 여름철에 보이는 GPP의 등락은 구름 영향 오차와 기상요인 양자에 의해 동시에 영향을 받으며, Eq. 3을 이용한 구름 영향 감쇄 알고리즘은 구름 영향에 의한 변동요인을 감쇄함으로써 기상요인에 의한 변동만을 복원하는 기능을 수행한다고 볼 수 있다.

구름 영향 감쇄 전후 영상간의 차이(구름영향오차)는 Fig. 3의 오른쪽 열의 시계열 그림과 같다. FPAR, LAI, GPP 모두 여름철에 높은 구름 영향 오차를 보였다. Fig. 2의 운량 시계열에서 겨울철의 운량이 여름철의 운량에 상당할 정도로 높았음에도 불구하고, Fig. 3에서 겨울철의 구름 영향 오차가 낮게 나타난 것은 각 변수들의 절대값이 여름철에 비해 겨울철에 낮기 때문으로 판단된다. 구름 영향을 감쇄하였을 경우 3년간 평균적으로 FPAR는 8.5%, LAI는 13.1%, GPP는 8.4% 씩 증가하였다.

식생형에 따른 구름 영향 오차

우리나라의 MODIS 토지 피복 영상에서 산림형 피복에 해당하는 상록침엽수림(ENF), 낙엽활엽수림(DBF), 혼효림(MF)에 대해 FPAR, LAI, GPP와 구름 영향 오차의 차이를 분석한 결과는 Table 1과 같다. 원 영상에서 2001~2003년간의 LAI는 ENF 3.0, DBF 2.8, MF 2.9였지만, 구름 영향을 감쇄한 후 각각 3.5, 3.2, 3.3으로 증가하였다. 이는 구름 영향 감쇄 전의 영상에 대해 각각 16.5, 14.6, 13.1% 증가한 것에 해당한다. 한편 구름 영향 감쇄 전에 GPP는 ENF 1,671 g C m² y⁻¹, DBF 1,251, MF 1,344를 보였으나, 구름 영향 감쇄 후에는 ENF 1,836 g C m² y⁻¹, DBF 1,369, MF 1,460로 증가하였다. 이러한 구름 영향 감쇄에 따른 증가량은 원 GPP 영상에 대해 ENF 9.9, DBF 9.5, MF 8.6%에 상당한 값이다.

구름 영향의 감쇄는 FPAR, LAI, GPP의 연 변화 패턴에도 영향을 미쳤다. 각 변수 모두 구름 영향 감쇄 전에는 2001년에 최대값을 2003년에 최소값을 보였지만, 구름 영향 감쇄 후에 최대값은 2002년 혹은 2003년에 나타났다. 따라서 MODIS 영상의 구름 영향 오차를 감쇄하지 않을 경우 왜곡된 연간 변화 패턴을 감지하게 될 위험이 있다. 한편 FPAR, LAI, GPP에서 ENF의 구름 영향 오차가 다른 식생형에 비해 높은 값을 보였는데 이는 낙엽활엽수에 비해 상록활엽수의 생육기간이 긴 까닭에 구름 영향을 받는 기간이 늘어남으로써 다른 식생형에 비해 높은 구름 영향 오차가 발생한 것으로 해석된다.

구름 영향 오차의 공간분포 특성

Fig. 4는 구름 영향 감쇄 후와 감쇄 전의 차이(구름 영향 오차)를 보여주는 영상으로 2001~2003년간 대부분의 지역에서 구름

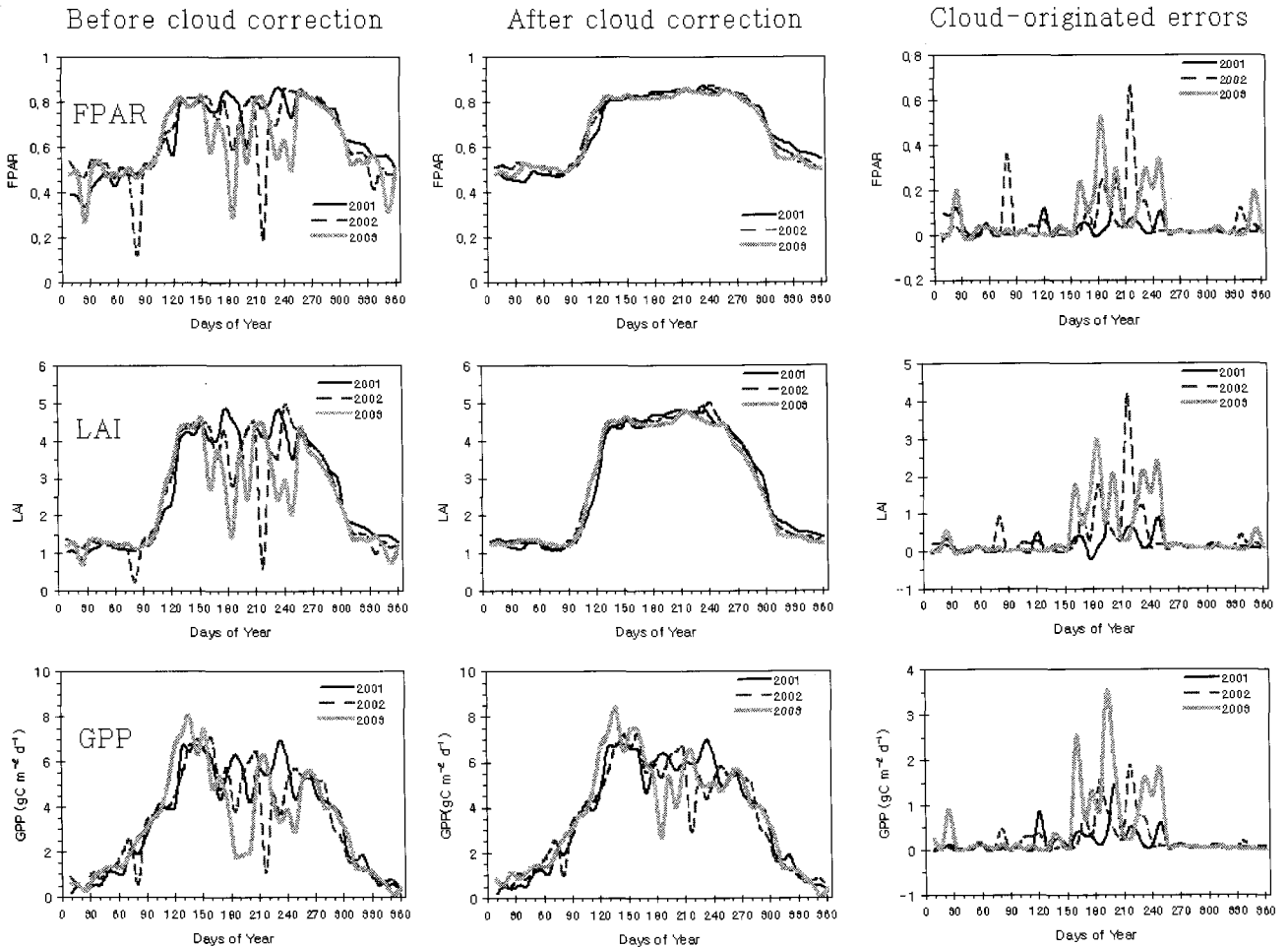


Fig. 3. Time series of 8-day FPAR (upper row), LAI (middle row), and GPP (lower row, $g C m^{-2} d^{-1}$) for years 2001~2003. Left, middle, and right columns are time series of original images before cloud correction, cloud-corrected images, and differences between original and cloud-corrected images, respectively.

영향 감소 후에 값이 증가하였다. LAI와 GPP 모두 운량이 증가함에 따라 오차가 증가하는 경향을 보였으며, 강수량이 가장 많았던 2003년에 가장 큰 오차가 발생하였다. 한편 Fig. 4의 6월에서 9월간 운량과 LAI, GPP의 구름 영향 오차 간에 다소 상이한 공간 패턴이 나타났다. 일례로 2003년 영상을 보면 LAI와 GPP 영상에서 높은 오차를 보이는 지역은 운량이 높은 지역보다 다소 남쪽에 치우쳐 분포하였다. 이는 우리나라 남부지방의 경우 온화한 기후조건에 따라 북쪽 지역보다 연간 생육기간이 길며, 연간 GPP가 높기 때문에 상대적으로 적은 운량에 대해서도 보다 큰 영향을 받기 때문으로 사료된다. 이와 같은 이유에서 상록활엽수가 다수 분포하는 제주도 지역에서 가장 큰 GPP의 오차가 나타난 것으로 판단된다.

구름 영향 오차에 대한 몬순기후의 영향

Fig. 3의 오른쪽 열 그림들은 FPAR, LAI, GPP의 구름 영향 오차가 6월에서 9월 기간에 집중하여 나타남을 보여주는데, 이는 우리나라 몬순 기후의 특징인 여름철의 집중 강우 영향으로 판

단된다. 6월에서 9월의 우기 중 구름 영향 오차가 연간 구름 영향 오차에서 차지하는 비율은 GPP의 경우 78%, LAI는 79%, FPAR는 67%에 달하여 우기 중의 구름 영향 오차가 각 변수에서 나타난 연간 구름 영향 오차의 상당 부분을 차지하였다.

몬순기후의 MODIS 영상 구름 영향 오차에 대한 영향은 8일 단위의 우리나라 평균 구름 영향 오차와 운량 간의 회귀분석을 통해 다시 한번 확인되었다. Fig. 5는 우기에 해당하는 6월에서 9월까지의 자료를 이용한 8일 평균 구름 영향 오차와 운량간의 산점도로서, 양자간에 높은 상관성을 보여준다. 운량은 각 변수의 구름 영향 오차를 설명하는 훌륭한 지표로서 FPAR의 경우 0.84-0.88, LAI 0.85-0.91, GPP 0.41-0.90의 결정계수(r^2)를 보였다(Fig. 5). 반면에 우기 외의 자료까지 모두 포함하여 회귀분석을 수행한 결과 구름 영향 오차에 대한 운량의 설명력이 현저히 떨어짐을 알 수 있었다. 후자의 경우, 결정계수(r^2)는 FPAR의 경우 0.58-0.64, LAI 0.30-0.53, GPP 0.21-0.47의 범위에 분포하였다. 이러한 분석 결과는 구름 영향 오차가 몬순 기후의 우기 중에 집중하여 나타나며, 우기 중 운량은 구름 영향 오차의

Table 1. Annual means of fraction of absorbed PAR (FPAR), leaf area index (LAI, $m^2 m^{-2}$), and annual totals of gross primary production (GPP, $g C m^{-2} y^{-1}$) for years of 2001~2003. 'O' and 'F' in parentheses indicate 'original' and 'filled' images before and after cloud correction algorithm applied, respectively.

	Year	ENF(O)	DBF(O)	MF(O)	ENF(F)	DBF(F)	MF(F)
FPAR	2001	0.70	0.64	0.68	0.75	0.68	0.71
	2002	0.67	0.64	0.67	0.76	0.69	0.73
	2003	0.66	0.59	0.63	0.75	0.67	0.71
	Mean	0.68	0.62	0.66	0.75	0.68	0.72
LAI	2001	3.1	2.9	3.0	3.5	3.2	3.2
	2002	3.0	2.8	2.9	3.5	3.2	3.3
	2003	2.9	2.5	2.7	3.4	3.1	3.2
	Mean	3.0	2.8	2.9	3.5	3.2	3.3
GPP ($g C m^2 y^{-1}$)	2001	1,721	1,302	1,392	1,837	1,364	1,455
	2002	1,680	1,249	1,345	1,848	1,342	1,444
	2003	1,610	1,201	1,295	1,823	1,402	1,482
	Mean	1,671	1,251	1,344	1,836	1,369	1,460

ENF, evergreen needleleaf forest; DBF, deciduous broadleaf forest; MF, mixed forest.

정도를 설명하는 중요한 지표로 사용가능함을 의미한다.

고 찰

인공위성 영상을 이용한 지구 관측 시스템의 구축이 가시화 되어감에 따라 초기의 실험적인 결과들이 제공되기에 이르렀다. MODIS의 식생관련 영상들은 이러한 연구의 최첨단 결과로써 현재 1 km 해상도의 8일 단위 FAPR, LAI, GPP, 그리고 연 단위의 NPP 영상들이 제공되고 있으며, 향후 250 m 해상도의 영상이 제공될 예정이다. 비록 1 km의 공간해상도의 MODIS 영상은 우리나라와 같이 조밀한 토지 이용과 복잡한 지형 조건을 가진 곳에서의 생태학적 변수를 추출해 내는 데에 많은 제한이 따르지만(Kang et al. 2005, Kim and Lee 2003), 아직까지는 지역수준의 생태계 변화 모니터링을 위한 훌륭한 대안이라 하겠다. Landsat TM 혹은 ETM+, IKONOS와 같은 영상은 MODIS에 비해 매우 향상된 공간해상도를 가지고 있지만, 보름 이상의 촬영주기를 가지고 있어 일 단위의 촬영주기를 가진 MODIS에 비해 매우 낮은 시간 분해능을 보인다. 따라서 개엽 및 낙엽시기를 감지하거나, 기상의 변화에 따라 상당한 일변화를 보이는 광합성량 혹은 증발산량 등을 탐지하는 데에는 그다지 효과적이지 못하다. 따라서 아직까지는 지역수준의 식물계절학 연구 혹은 생태

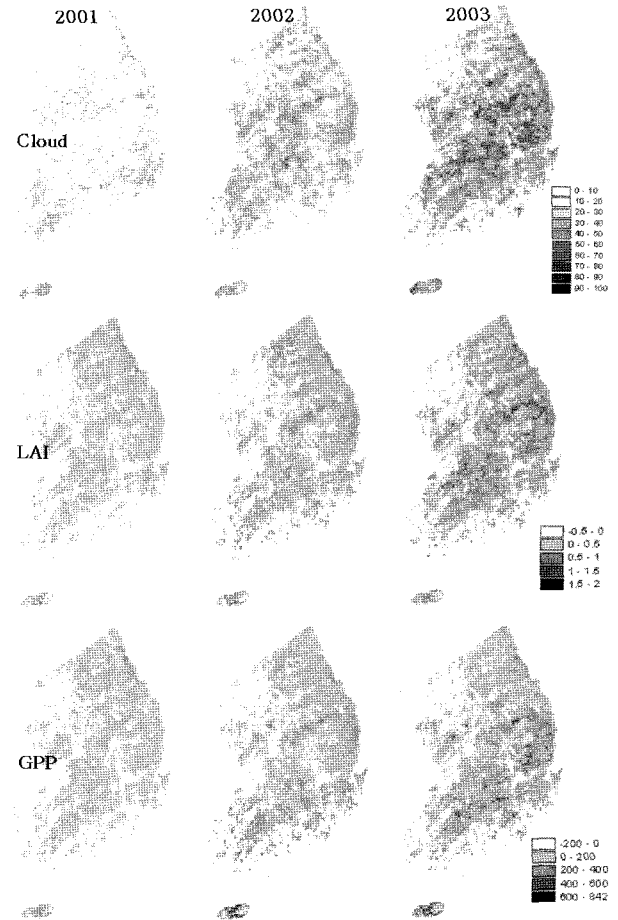


Fig. 4. Spatial maps showing fraction of cloud cover (%) for June-September (upper row), differences between cloud-corrected and original LAI (middle row), and differences between cloud-corrected and original GPP ($g C m^2 d^{-1}$) (lower row) for years 2001 (left), 2002 (middle), and 2003 (right column), respectively.

계 물질 순환 연구에서 MODIS나 NOAA AVHRR과 같은 1 km 공간해상도 수준의 높은 시간 분해능을 가진 인공위성 영상들이 선호되고 있는 실정이다(White et al. 1997, Nemani et al. 2003).

인공위성 영상을 사용하여 지표의 생물리학적 변수를 모니터링하는 데에 있어 구름의 존재는 영상분석 결과에 상당한 불확실성을 야기하기 때문에(Cihlar et al. 1999, Kang et al. 2005), 주기적인 육상 생태계 모니터링을 위해선 구름에 의해 오염된 픽셀의 값을 의미 있는 값으로 복원하는 구름 영향 감쇄 기법을 적용하여야 한다. 본 연구에서는 우리나라를 대상으로 2001년에서 2003년간 MODIS FPAR, LAI, GPP 영상에 나타난 구름 영향 오차를 감쇄하는 알고리즘을 수행함으로써 몬순 기후에서의 구름 영향 오차를 평가하였다. 본 연구에서 수행한 다양한 분석에 대해 아래와 같은 결론을 내릴 수 있다.

구름 영향 오차를 감쇄하였을 경우 3년간 평균적으로 FPAR

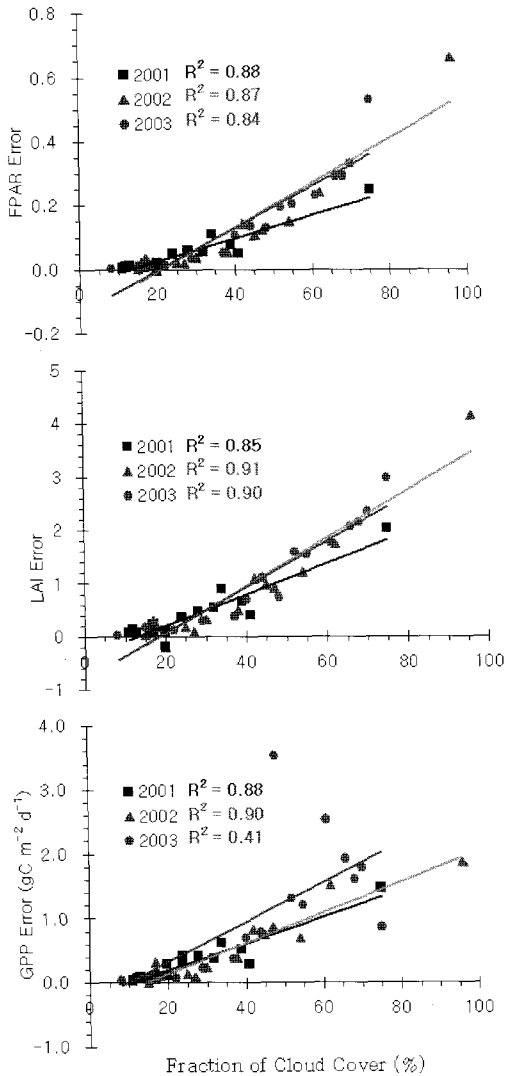


Fig. 5. Scatter plots between fraction of cloud covers (%) and mean cloud-originated errors in the 8-day MODIS images of (a) FPAR, (b) LAI, and (c) GPP (g C m⁻² d⁻¹) from June to September for years 2001~2003.

8.5%, LAI 13.1%, GPP 8.4% 증가하였으며, 대부분의 오차는 6~9 월간에 집중적으로 발생하여 FPAR, LAI, GPP의 경우 6~9월 간의 오차가 연간 오차의 각각 67%, 79%, 78%를 차지하였다.

운량의 공간분포와 각 변수들의 구름 영향 오차 공간분포 간에 차이가 있었다. 대체적으로 운량과 LAI 및 GPP 구름 영향 오차에서 높은 값을 보인 지역이 순차적으로 서서히 남쪽으로 이동하는 양상을 보였다. 구름 영향 오차는 운량 외에도 각 지역의 기상요인 및 식생의 생육기간 등에 복합적으로 영향을 받기 때문으로 판단된다.

운량이 집중하여 나타나는 6월에서 9월의 경우 운량은 구름 영향 오차를 설명하는 훌륭한 지시자로서 2001~2003년간 FPAR의 경우 0.84, LAI 0.89, GPP 0.6의 결정계수(R²)를 보였다. GPP의 경우, 상대적으로 낮은 결정계수를 보인 까닭은 운량과

함께 기상요인, 생육기간 등이 중요한 영향을 미치기 때문이다.

FPAR, LAI, GPP 모두 상록침엽수림(ENF) 식생형에서 가장 높은 값을 보였으며, 구름 영향 오차 역시 가장 높았다. 한편 구름 영향 오차 감쇄 전과 후에 각 식생형의 연 변화 패턴에 차이가 나타났다. GPP의 경우, 구름 영향 감쇄 전엔 모든 식생형에서 2001년에 가장 높은 값을 보였지만, 구름 영향 감쇄 후엔 ENF의 경우 2002년에 그리고 DBF와 MF의 경우 2003년에 가장 높은 연간 GPP를 보였다. 이러한 분석 결과는 MODIS 식생 관련 영상에서 구름 영향 오차를 감쇄하지 않은 경우 그 시공간 패턴에 심각한 불확실성이 내포되어 있음을 보여준다.

본 연구 결과 우리나라의 육상 생태계 변화 모니터링에 MODIS 영상을 이용하기 위해선 사용에 앞서 구름 영향 오차를 감쇄하는 전처리 과정을 수행할 필요가 있다고 판단되며, 이러한 전처리 과정을 통해 의미 있는 LAI, GPP의 공간 분포와 시계열 패턴을 복원할 수 있음을 보였다. 우리나라 육상 생태계를 대상으로 MODIS 식생 관련 영상을 활용하기 위한 다음 단계의 연구 과제는 영상에서 제시하는 LAI와 GPP 값의 정확성을 지상 측정 자료를 이용해 검증하는 작업이다. 현재 세계 유수의 연구진들에 의해 MODIS 영상의 신뢰도 평가가 진행 중에 있으며 (Cohen and Justice 1999, Morisette et al. 2002, Myneni et al. 2002, Turner et al. 2003), 국내에서도 이와 유사한 연구들이 진행되어 왔다(강 등 2005, 김 2005, Hwang 2004, Kim and Lee 2003, Lee et al. 2003). 하지만 향후 식물계절학 및 식생 일차 생산성 분야의 연구자와 식생 관련 원격탐사학자와의 긴밀한 협동연구를 통해 보다 광범위한 영상 검증작업을 수행하여 우리나라 육상 생태계에 대한 MODIS 식생 관련 영상의 신뢰도를 평가하고 육상 생태계 모니터링에 MODIS 영상을 활용하는 방안을 다각도로 모색할 필요가 있다고 보여진다.

적 요

미국항공우주국은 지구 관측 시스템(EOS) 프로그램의 일환으로 1999년에 Terra를 2001년에 Aqua 인공위성을 발사하였다. MODIS는 EOS의 핵심 원격 탐사 센서로서 육상 생태계의 식물계절학과 물질 순환 모니터링을 위한 8일 단위의 엽면적지수(LAI), 유효 광합성 광량 중 식생에 흡수된 비율(FPAR), 총 일차 생산성(GPP) 영상을 제공하고 있다. 본 연구에서 우리나라를 대상으로 식생형에 따른 2001~2003년 간의 MODIS LAI, FPAR, GPP를 분석하였으며, 구름 영향에 의한 각 영상의 오차를 평가하였다. 분석 결과 연간 GPP는 침엽수림 1,836, 활엽수림 1,369, 혼효림 1,460 g C m⁻² y⁻¹로 나타났으며, 각 변수에서 구름에 의해 야기된 오차는 FPAR 8.5, LAI 13.1, GPP 8.4%에 달하는 것으로 분석되었다. 특히 GPP의 경우 6월에서 9월까지의 오차가 연간 오차의 78%를 설명하는 것으로 나타나, 몬순기후가 MODIS 영상의 오차에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 본 연구는 향후 MODIS 식생 관련 영상들이 우리나라의 식물계절학과 일차 생산성 모니터링에 유용하게 사용될 수 있으며, 이

들 영상을 사용하기에 앞서 구름 영향 오차를 감쇄하는 영상의 전처리 과정을 수행할 필요가 있음을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대핵심환경기술개발사업(Eco-Techopia 21 Project)” 및 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-8-2)의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다. 본 논문을 위해 귀중한 조언을 주신 익명의 심사위원께 감사드립니다.

인용문헌

- 강신규, 김영일, 김영진. 2005. MODIS 총일차생산성 산출물의 오차 요인 분석: 입력기상자료의 영향. 한국농림기상학회지 7(2): 171-183.
- 김준. 2005. KoFlux 2004 Synthesis: 한국 생태계의 탄소와 물 순환의 이해를 통한 기후변화협약대응. 한국농림기상학회지 7(1): 1-3.
- Cihlar, J., R. Latifovic, J. Chen and Z. Li. 1999. Testing near-real time detection of contaminated pixels in AVHRR composites. Canadian Journal of Remote Sensing, 25, 160-170.
- Cohen, W.B. and C.O. Justice. 1999. Validating MODIS terrestrial ecology products: linking *in situ* and satellite measurements. Remote Sensing of Environment 70: 1-4.
- Heinsch, F.A., M. Reeves, C.F. Bowker, P. Votava, S. Kang, C. Milesi, M. Zhao, J. Glassy, W.M. Jolly, J.S. Kimball, R.R. Nemani and S.W. Running. 2003. User's guide: GPP and NPP (MOD17A2/A3) products, NASA MODIS Land Algorithm. <http://www.forestry.umd.edu/ntsg/>.
- Hwang, T.H. 2004. Spatial analysis of carbon and water processes with RHESSys model in the Gwangneung experimental forest. A thesis in Master Degree, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Kang, S., S.W. Running, J. Lim, M. Zhao, C. Park and R. Loehman. 2003. A MODIS-based climatological phenology model for detecting onset of growing seasons in temperate mixed forests in Korea. Remote Sensing of Environment 86: 232-242.
- Kang, S., D. Lee and J.S. Kimball. 2004. The effects of spatial aggregation of complex topography on hydro-ecological process simulations within a rugged forest landscape: Development and application of a satellite-based topoclimatic model. Canadian Journal of Forest Research 34(3): 519-530.
- Kang, S., S.W. Running, M. Zhao, J.S. Kimball and J. Glassy. 2005. Improving continuity of MODIS terrestrial photosynthesis products using an interpolation scheme for cloudy pixels. International Journal of Remote Sensing 26(8):1659-1676.
- Kim, S. and K. Lee. 2003. Local validation of MODIS Global Leaf Area Index (LAI) product over temperate forest. Korean Journal of Remote Sensing 19:1-9.
- Lee, K., S. Kim, Y. Park and K. Jang. 2003. Generation of forest leaf area index (LAI) map using multispectral satellite data and field measurements. Korean Journal of Remote Sensing 19:371-380.
- Morisette, J.T., J.L. Privette and C.O. Justice. 2002. A framework for the validation of MODIS Land products. Remote Sensing of Environment 83: 77-96.
- Myneni, R.B., S. Hoffman, Y. Knyazikhin, J.L. Privette, J. Glassy, Y. Tian, Y. Wang, X. Song, Y. Zhang, G.R. Smith, A. Lotsch, M. Friedl, J.T. Morisette, P. Votava, R.R. Nemani and S.W. Running. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. Remote Sensing of Environment 83: 214-231.
- Nemani, R.R., C.D. Keeling, H. Hashimoto, W.M. Jolly, S.C. Piper, C.J. Tucker, R.B. Myneni and S.W. Running. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. Science 300: 1560-1563.
- Prince, S.D. and S.N. Goward. 1995. Global primary production: A remote sensing approach. Journal of Biogeography 22: 815-835.
- Running, S.W., C.O. Justice, V. Salomonson, D. Hall, J. Barker, Y.J. Kaufmann, A.H. Strahler, A.R. Huete, J.P. Muller, J.P., V. Vanderbilt, Z.M. Wan, P. Teillet and D. Carneggie. 1994. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. International Journal of Remote Sensing 15: 3587-3620.
- Running, S.W., D. Baldocchi, D. Turner, S.T. Gower, P. Bakwin, and K. Hibbard. 1999. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. Remote Sensing of Environment 70: 108-127.
- Turner, D.P., W. Ritts, W.B. Cohen, S.T. Gower, M. Zhao and S.W. Running. 2003. Scaling gross primary production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation. Remote Sensing of Environment 88: 256-270.
- White, M.A., P.E. Thornton and S.W. Running. 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. Global Biogeochemical Cycles 11: 217-234.
- Zhao, M., F.A. Heinsch, R.R. Nemani and S.W. Running. 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global dataset. Remote Sensing of Environment 95: 164-176.

(2005년 5월 25일 접수; 2005년 8월 8일 채택)