MODIS 광합성유효복사흡수율과 WRF 기상자료를 이용한 북한지역의 총일차생산성 추정

도나영* · 강신규*[†] · 명수정** · 천태훈* · 이지혜* · 이종범*

*강원대학교 자연과학대학 환경과학과, **한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터

The Estimation of Gross Primary Productivity over North Korea Using MODIS FPAR and WRF Meteorological Data

Nayoung Do*, Sinkyu Kang*[†], Soojeong Myeong**, Taehun Chun*,
Jihye Lee* and Chong Bum Lee*

*Department of Environmental Science, Kangwon National University,

**Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute

Abstract : NASA MODIS GPP provides a useful tool to monitor global terrestrial vegetation productivity. Two major problems of NASA GPP in regional applications are coarse spatial resolution ($1.25^\circ \times 1^\circ$) of DAO meteorological data and cloud contamination of MODIS FPAR product. In this study, we improved the NASA GPP by using enhanced input data of high spatial resolution ($3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$) WRF meteorological data and cloud-corrected FPAR over the North Korea. The improved GPP was utilized to investigate characteristics of GPP interannual variation and spatial patterns from 2000 to 2008. The GPP varied from 645 to 863 $\text{gC m}^{-2} \text{y}^{-1}$ in 2000 and 2008, respectively. Mixed forest showed the highest GPP ($1,076 \text{ gC m}^{-2} \text{y}^{-1}$). Compared to NASA GPP ($790 \text{ gC m}^{-2} \text{y}^{-1}$), FPAR enhancement increased GPP (861) but utilization of WRF data decreased GPP (710). Enhancements of both FPAR and meteorological input resulted in GPP increase (809) and the improvement was the greatest for mixed forest regions (+10.2%). The improved GPP showed better spatial heterogeneity reflecting local topography due to high resolution WRF data. It is remarkable that the improved and NASA GPPs showed distinctly different interannual variations with each other. Our study indicates improvement of NASA GPP by enhancing input variables is necessary to monitor region-scale terrestrial vegetation productivity.

Key Words : Gross primary productivity, North Korea, MODIS, WRF, FPAR

요약 : 미국항공우주국(NASA)의 MODIS GPP 자료는 육상식생의 총일차생산성(GPP) 모니터링에 중요한 수단을 제공한다. 그러나 GPP 추정의 입력자료로 사용하는 DAO기상자료의 거친 공간해상도($1.25^\circ \times 1^\circ$)와 FPAR 자료의 구름영향에 의한 신뢰도 저하 등은 지역 수준의 GPP 모니터링에 문제를 야기한다. 이 연구에서는 북한지역을 대상으로 FPAR의 구름영향 제거하고 고해상도($3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$) WRF 기상자료를 사용함으로써 입력자료의 문제를 개선한 GPP를 추정한 후, 2000-2008년 간의 GPP 연간 변동특성 및 지역

접수일(2011년 11월 11일), 수정일(1차 : 2012년 2월 4일, 2차 : 3월 2일), 게재확정일(2012년 3월 6일).

[†] 교신저자: 강신규(kangsk@kangwon.ac.kr)

적 분포특성을 분석하였다. 개선한 GPP는 2000년의 $645 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 에서 2008년의 $863 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 까지 변화하였고, 혼효림지역이 $1,076 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 으로 가장 큰 값을 보였다. NASA GPP ($790 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$)에 비해 FPAR 개선 후 GPP가 증가하였고(861), WRF 자료 이용 시 감소(710), FPAR와 WRF 자료 이용 시 다소 증가(809)하는 양상을 보였다. 개선효과는 북한에서 제일 큰 면적을 차지한 혼효림에서 가장 뚜렷하였다(+10.2%). 한편 WRF 기상자료가 DAO에 비해 지형적 영향을 보다 잘 반영함으로써, 결과적으로 개선한 GPP의 공간이질성이 증가한 것으로 나타났다. 각 피복유형별 연간변동성을 분석한 결과 개선한 GPP는 NASA GPP와 상이한 연간변화를 보였다. 위 결과들을 종합하면, 북한 등의 지역수준의 GPP 모니터링을 목적으로할 경우, 입력자료의 개선에 의한 MODIS GPP를 재산출할 필요가 있다고 보여진다.

1. 서론

기온상승과 강수량 변동으로 인해 기후변화 현상이 심화되면서 세계각지에서 식생대 이동과 같은 생태계의 변화와 홍수와 가뭄, 산불 및 산사태와 같은 자연재해의 피해 또한 확산되고 있다. 기후변화의 영향은 농업지대의 분포와 작물의 생산성 및 작황에도 영향을 미치고 있어 기후변화에 제때 적절히 대응하지 못한다면 식량부족과 같은 문제를 초래할 수도 있다. 특히, 오랜 식량난으로 전 세계로부터 식량 원조를 받고 있는 북한의 경우(명수정 외 2009; Kim *et al.*, 1998), 기후변화로 인한 생태계의 변화와 자연재해의 증가는 작황의 감소 뿐 아니라 식량안보를 위협하는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 산림생태계와 작물에 대한 일차생산성(primary productivity)을 모니터링 하는 것은 육상생태계 변화에 대한 평가는 물론, 장기간의 식량난을 겪고 있는 북한의 식량안보 측면에서 매우 중요한 정보를 제공할 수 있다. 그러나 현장 혹은 통계자료의 접근이 어려운 북한 지역을 대상으로 한 일차생산성 추정 연구는 매우 부족한 상황으로, 대안적으로 인공위성자료와 같은 간접적인 자료를 이용해 일차생산성을 추정할 필요가 있다.

일차생산성은 식생이 대기 중의 이산화탄소를 흡수하여 바이오매스로 고정하는 과정이다. 일차생산성을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로는 현장실험을 통하여 대기의 탄소흐름을 측정하는 플럭스타워 관측과 위성영상 기반의 일차생산성 추정, 생태계 모형을 이용한 방법 등이 주로 사용되어 왔다(Running *et al.*, 1999). 위성영상 기반의 일차생산성 추정의 대표적 예로서, 미 항공우주국(NASA)은 지구관측시스템(Earth Observing System, EOS)의 일환으로 Moderate Resolution Image Spectrometer (MODIS) 위성영상 기반의 총일

차생산성(Gross Primary Productivity, GPP)과 순일차생산성(Net Primary Productivity, NPP) 자료를 제공한다(Running *et al.*, 2000). 이외에도, NOAA에서 제공하는 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)의 정규화식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)를 이용하여 생태학적, 생물리학적 과정을 기반으로 한 일차생산성 추정 연구들이 진행되어 왔다(Peng *et al.*, 2008; Maselli *et al.*, 2006; Cao *et al.*, 2004). 최근에는, 기상자료를 이용하지 않고 MODIS 식생지수와 지표면온도만을 이용해 GPP를 추정하는 경험모형도 개발되었다(Xiao *et al.*, 2010; Sims *et al.*, 2008).

Terra와 Aqua 인공위성에 탑재된 MODIS는 36개 분광밴드 자료로부터 다양한 시공간 해상도의 육상, 대기, 그리고 해양의 환경변수를 추정하며, 육상생태계의 일차생산성과 관련하여 8일 단위의 GPP자료와 연 단위의 NPP를 제공한다. NASA MODIS GPP (향후, NASA GPP로 명명) 알고리즘은 Monteith(1977)가 제안한 빛 이용효율(Light Use Efficiency, LUE) 모형을 사용한다(Running *et al.*, 2004). 이 알고리즘은 일 단위 기상자료와 식생의 광합성유효복사 흡수율(Fraction of absorbed Photosynthetically, FPAR)을 시계열 입력자료로, 토지피복지도를 식생형 분포 자료로, 그리고 식생형에 따른 생물리학적 모수값을 모형 파라미터로 사용해 일 단위 GPP를 추정한 후, 이를 8일 단위로 합산하는 방식을 취하고 있다. 이 때, 일 단위 기상자료는 NASA에서 제작한 Data Assimilation Office (DAO) 기상자료를 사용하며, FPAR와 토지피복지도는 MODIS 위성자료를 이용한다.

NASA GPP 자료는 광역지역의 일차생산성에 대한 유용한 정보를 제공하지만, NASA GPP 원자료를 바로

북한지역의 일차생산성 추정에 적용하기에 다음의 몇 가지 한계가 있다. 첫째, 장기간의 구름 영향을 완전히 제거하지 못한 MODIS FPAR 자료는 지표식생의 유효 광합성복사 흡수율에 오차를 발생시킬 수 있다(강신규, 2005; Kang *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2005). 둘째, NASA GPP 추정에 사용하는 DAO 기상입력자료는 경도 1.25도, 위도 1도의 상당히 거친 공간해상도를 가지기 때문에, 우리나라와 같이 삼면이 바다이고 복잡한 지형 특징을 가지는 지역에서는 기상의 상세한 공간이질성을 반영하기 어렵다(강신규 등, 2005). 셋째, 알고리즘에 사용된 계수 값들은 전 지구 규모의 일차생산성 감시를 위해 개발된 것이기 때문에, 기후, 토질 등의 지역 특성을 반영한 계수 값을 도출할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 앞서 제시한 NASA GPP 추정 문제점을 개선하기 위해 구름 영향을 간직한 FPAR 자료를 내삽하는 알고리즘을 개발하여 자료의 결손이 없는 FPAR 자료를 생산하였다. 또한 DAO 기상자료를 대신할 수 있는 고해상도의 대안적인 기상자료로서 역학적 기상예측모형인 Weather Research and Forecasting (WRF)로부터 생산한 3 km 공간해상도의 격자형 기상자료를 사용하였다. 마지막으로 이와 같이 개선한 입력자료를 사용하여 추정한 GPP를 NASA GPP 원자료와 비교함으로써, 입력자료의 개선으로 인한 GPP 추정의 개선 효과를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

1) 연구지역

이 연구의 공간적 범위는 북한 전역이며, 연구의 시간적 범위는 2000년부터 2008년까지이다. 북한의 토지 이용 현황 자료는 UMD (University of Maryland) 분류기준에 따른 MODIS 1 km 토지피복지도를 NASA GPP/NPP 알고리즘에 사용되는 식생피복형에 따라 재분류하였다(Fig. 1a). MODIS 토지피복지도는 연단위로 제공되며 전지구적으로 75~80%의 신뢰도를 가지며, 각 토지피복유형에 대해 60~90%의 정확도를 가진다(Friedl *et al.*, 2002). 특히, 한반도가 포함된 유라시아 대륙은 평균적으로 67.8%의 정확도를 보이며, 혼효림

(MF)은 65.4%, 낙엽활엽수림(DBF)은 65.9%, 농경지(Cropland)는 76.4%의 정확도를 보인다(Friedl *et al.*, 2002). MODIS 토지피복지도에 따른 북한 각 토지피복 유형의 점유율은 물이 1.0%, 상록수림 1.2%, 활엽수림 15.1%, 혼효림 42.5%, 관목 0.7%, 초원 1.7%, 농경지가 33.3%, 도시지역이 0.2% 등이었다. 농경지는 주로 황해도와 평안도에 널리 분포하고, 동해안 해안가를 따라 일부 분포하였다(Fig. 1a). 북부지역에 산림이 널리 분포하였고, 남부지역의 산림은 많이 분절화된 모습을 보였다. 북부지역에 혼효림이 널리 분포한 반면, 태백산맥의 동쪽사면과 남부지역에는 낙엽수림이 우세한 분포를 보였다.

2) NASA GPP 알고리즘

NASA GPP 알고리즘은 Monteith (1977)가 제안한 LUE (Light Use Efficiency, ϵ) 모형을 사용한다(Eq. 1-3). LUE에 영향을 미치는 환경인자들로는 기온, 대기습도, 토양수분 등이 널리 거론되었다. 그러나 NASA GPP 알고리즘은 전 지구 감시를 목적으로 가용한 정보만을 이용하므로 위성영상에서 추정이 어려운 토양수분은 제외하고 대기수증기포차(VPD)와 일 최저기온($T_{\min}$)만을 고려하는 방식으로 설계되었다(Eq. 2). 따라서, 건조지역에서 수분에 의한 광합성 조절인자를 VPD만 고려할 경우, GPP가 과대평가되는 경향이 나타날 수 있다(Mu *et al.*, 2007; Hwang *et al.*, 2008).

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

$$\epsilon = [\epsilon_{\max} \cdot f(T_{\min}) \cdot f(VPD)] \quad (2)$$

$$PAR = [0.45 \times R_s] \quad (3)$$

이상의 식에서 FPAR는 PAR 중에서 임관에 흡수된 비율로서, 인공위성 분광영상자료를 활용해 추정 가능한 정보이다. ϵ 은 식물의 복사사용효율(radiation use efficiency)이며, $\epsilon_{\max}$ 는 최대빛이용효율, $T_{\min}$ 은 일 최저기온, VPD는 대기수증기포차, R_s 는 총 일사량이다. 이 때, 식생의 일차생산성에 영향을 주는 환경제한인자인 $f(T_{\min})$ 과 $f(VPD)$ 는 0에서 1사이의 값을 가지며, 식생형에 따라 상이한 값을 가지는 환경제한인자에 대한 임계치와 $\epsilon_{\max}$ 는 BPLUT (Biome Property Look-Up Table)의 값을 사용한다(Heinsch *et al.*, 2003).

NASA GPP 알고리즘은 위성영상기반의 GPP 추정
에 있어 알고리즘이 매우 단순하며, 입력자료 및 모수의
수가 적어 전 지구규모의 GPP 감시에 적합하다(Running
et al., 1999). NASA의 NASA GPP 알고리즘은 R_s ,
 T_{min} , VPD 등의 기상요소자료로 NASA의 DAO 기상
자료를 사용하고, MODIS15 FPAR 자료와 MODIS12
토지피복자료를 사용하도록 고안되었다.

3) 입력 자료 구축

본 연구에서는 위성영상을 활용하여 2000-2008년
에 걸쳐 북한지역의 GPP를 추정하기 위하여 MODIS
위성영상과 역학적 기상예측모형인 WRF로부터 생산된
격자기상자료를 수집하였다. MODIS 자료는 2000년부터
2008년간의 Terra MODIS 자료를 사용하였다.
Terra와 Aqua 위성은 태양 동주기 궤도를 가지며, 1-2
일 간격으로 지구 표면을 관찰한다. 특히, Terra 위성
에 탑재된 MODIS 센서는 북에서 남으로 오전 10시경, 오후
10시경에 우리나라를 통과한다.

수집한 MODIS 육상자료는 MOD12Q1 토지피복지
도와 MOD15A2 LAI/FPAR, MOD17A2 GPP 등이다.
토지피복지도는 1 km 공간해상도로 2004년 자료이며,
University of Maryland (UMD) 분류기준을 따랐다.
FPAR 자료는 1 km 공간해상도를 가지며, 8일 단위 자
료로서 연간 총 46개 영상을 제공한다. 구름영향에 의
한 자료 결손을 보정하기 위하여 MOD15A2 자료의 품
질관리(Quality Control, QC)자료를 사용하였다. 본 연
구에서 개발한 GPP 자료와의 평가를 위해 MOD17A2
GPP 원자료를 수집하였다. NASA GPP는 1 km 공간
해상도의 8일 단위 자료로 제공된다. MODIS 육상자료
는 Sinusoidal Projection 형식의 HDF 파일로 제공되
므로, 수집한 HDF 파일을 UTM Zone 52N의 지구투영
법에 따른 ENVI Image 파일로 변환하였다.

WRF 기상자료는 최근 향후 기후변화를 예측하거나
기상자료를 기초자료로 사용하는 여러 연구들에 사용되
어져 왔다(Molders, 2008; Byon *et al.*, 2008; Lynn
and Yair, 2010; Davitashvili *et al.*, 2011). Byon 등
(2008)은 10 km 격자형 WRF 기상자료를 남한 41개 기
상대 자료와 비교평가함으로써 WRF 기상자료의 신뢰
도를 입증하였다(Correlation coefficient for
perceived temperature > 0.85). 이 연구에서 사용한

WRF 기상자료는 북한 전 지역을 포함하는 3 km 격자
해상도로 매시간 단위의 다양한 기상자료를 포함한다.
시간단위 WRF 기상자료를 이용하여 GPP 추정에 필요
한 기상자료인 일최저기온(T_{min} , $^{\circ}C$), 하루 일사량(R_s ,
 $MJ\ d^{-1}$), 낮 시간 평균 대기수증기포차(VPD, Pa)를 일
단위 자료로 구축하였다.

4) 입력자료개선

본 연구는 FPAR 자료를 보정하기 위하여 각 영상픽
셀의 FPAR 시계열 자료에서 구름의 영향을 받은 자료
를 찾아내어 이를 제외하고, 전후 시기의 맑은 날 자료
로 내삽하여 보완하는 과정을 수행하였다. 제거할 값을
선정하는 데는 MOD15A2 QC flag 값을 우선적으로 고
려하였고, 이와 더불어 QC에 의해 탐지되지 않는 특이
한 변동을 찾아내어 보정하는 규칙을 만들어 적용하였
다. FPAR 자료 내삽기법은 각 픽셀에 대해 다음의 세
단계로 진행된다. 첫 번째 단계에서는 FPAR 자료와 합
계 제공된 QC flag 값을 이용해 구름 등의 영향이 명시
된 시기 자료를 제거한다. 결과적으로 연중 FPAR 시계
열은 자료결손을 가진 불연속적인 시계열을 가지게 된
다. 두 번째 단계에서 자료결손이 없는 전후 시기의
FPAR 값을 평균하여 제거한 자료를 대체함으로써, 연
속적인 FPAR 시계열을 제작한다. 하지만 여전히
FPAR 시계열은 여름철에 간혹 매우 낮은 값까지 떨어
지거나 혹은 증감을 반복하는 패턴을 보였다. 이는 QC
에 의해 탐지할 수 없는 구름의 영향이 남아 있기 때문
으로 사료된다. 세 번째 단계에서 이러한 구름영향을 추
가적으로 보정하기 위하여 직전 시기에 비해 20% 이상
FPAR 값이 감소하는 경우 비현실적인 값으로 판단하
여 제거하였고, 직전시기의 FPAR 값으로 대체하였다.
일본 토마코마이(TMK) 플렉스 타워 연구지의 2003년
도 FPAR 관측자료로부터 식생 성장기의 FPAR 자료의
변동성을 분석한 결과 약 20% 변동성을 발견하였다.
즉, 봄철의 경우 지속적으로 증가하고 가을철에 감소하
며, 여름철에 일정한 값을 유지하는 경향을 보였다. 이
들 일반적인 변화과정에서 봄철과 여름철에 20% 이상
감소하는 경우와 가을철에 20% 이상 증가하는 경우가
매우 드물게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 구름영향
에 의한 FPAR 증감의 임계치를 20%로 적용하였다.

기상입력자료는 시간단위 WRF자료로부터 아래의

방법을 이용해 일 단위 입력기상자료를 산출하였다. 각 픽셀별로 시간단위 지표 2 m 높이의 기온자료로부터 매일의 최저값($T_{\min}$)을 산출하여 일 단위 최저기온 지도를 입력기상자료로 구축하였다. 또, 시간단위 일사량을 합산하여 일 단위 일사량(R_s)을 제작하였다. WRF는 VPD 값을 직접 제공하지 않지만, 대기 수증기량에 대한 자료로 비습(q_a , kg kg^{-1})값을 주고 있어 비습과 기온(T_a , $^{\circ}\text{C}$), 기압(p_a , Pa)자료를 이용하여 매 시간대의 VPD를 계산한 후, 낮 시간 평균 VPD ($\text{VPD}_{\text{daytime}}$)를 산출하였다.

5) 통계분석

구름영향을 보정한 FPAR 자료와 WRF 입력기상자료에 의한 GPP 개선효과를 평가하기 위하여, NASA GPP 원자료와 각각의 입력자료 개선에 의해 산출된 GPP를 상호비교하였다. MOD15 FPAR 원자료와 구름영향을 보정한 FPAR의 2000–2008년간 6–9월 평균 지도를 제작해 공간패턴의 차이를 비교하였다. 각 8일 단위 자료에 대한 FPAR 개선자료와 원자료와의 차이를 비교하였다. GPP 자료는 (a) NASA GPP 원자료, (b) 개선한 FPAR와 DAO를 입력자료로 산출한 GPP, (c) FPAR 원자료와 WRF 기상자료를 이용한 GPP, 그리고 (d) 개선한 FPAR와 WRF 기상자료를 이용한 GPP 등 총 네 가지 자료세트를 제작한 후, 각 토지피복 유형 별로 입력자료의 개선에 따른 GPP 변화를 정량적으로 평가하였다. 또한 각 8일 단위의 GPP 원자료와 개선자료와의 차이를 비교하였다. 연구기간 중의 GPP 연변동성을 조사하기 위해, 각 토지피복유형 별로 2000–2008년 평균 GPP에 대한 변이, 즉 아노말리(anomaly) 분석을 수행하였다.

3. 결과

1) WRF 기상자료 분석

WRF 기상자료에 따르면 연구기간 중 북한 전역의 연평균 $T_{\min}$ 은 2.9°C 에서 4.4°C 까지 변동하였다. 가장 낮은 해는 2000년이었고, 2007년에 가장 높았다. 연평균 R_s 는 $15.8\sim 16.9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 변화를 보였고,

2007년에 가장 낮았고 2001년에 가장 높았다. VPD는 2007년의 647.5 Pa 부터 2000년의 803.6 Pa까지 변동하였다. 기상요소의 연 변동을 살펴본 결과 2000년과 2001년에 $T_{\min}$ 이 낮은 반면 R_s 와 VPD는 높았고, 반대로 2007년에 R_s 와 VPD가 낮은 반면 $T_{\min}$ 이 높은 상반된 양상을 보였다.

위도와 해발고도에 따른 $T_{\min}$ 의 지역적 차이가 분명하였다(Fig. 1b). 지역에 따라 -10°C 에서 12°C 의 분포를 보였다. R_s 의 공간분포는 $T_{\min}$ 과 상이하였다(Fig. 1c). 함경북도 동부지역에서 가장 낮은 값을 보였으며, 함경남도 해안지역에서도 상대적으로 낮은 R_s 를 보였다. 지역에 따라 $12.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 에서 $18.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 분포를 보여, 최대 45% 정도의 시공간적 차이를 보였다. 한편 VPD는 $T_{\min}$ 에서와 같이 해발고도 혹은 산지 지형의 영향을 크게 보였다(Fig. 1d). 내륙지역에서 고지대에 비해 저지대에서 VPD가 더 높았던 반면에 저지대 해안지역은 상대적으로 낮은 VPD를 보였다. VPD는 110 Pa 에서 1220 Pa까지 변화하여 약 1000%의 시공간 변동을 보였다.

2) MODIS FPAR 개선결과

FPAR의 공간분포는 토지피복지도와 매우 유사하였다(Fig. 1a and Fig. 2d). 특히, 산림과 농경지간의 FPAR가 매우 상이하게 나타났으며, 혼효림(MF)에 비해 낙엽활엽수림(DBF)이 우세한 지역에서 FPAR값이 다소 높은 경향을 보였다. 각 연도별로 구름영향을 보정한 FPAR 지도를 생산한 결과 FPAR의 공간분포는 평균 FPAR 지도와 매우 유사하게 나타났다. 따라서 FPAR의 공간분포는 토지피복에 의해서, 연 변동 특성은 생육기상환경에 따라 주요하게 영향을 받는 것으로 보인다.

구름영향 보정에 의해 2000–2008년간 FPAR는 평균적으로 9.7% 증가하였다. 특히 2004년에는 북한 전역의 평균 FPAR가 13.3%로 가장 큰 증가를 보였고, 2001년에 6.9%로 가장 낮은 보정효과를 나타냈다. 온량이 많은 여름철에 구름영향 보정효과가 크게 나타났으며, 최대 103%까지 FPAR 증가경향을 보였다(Fig. 3a, b, c). 토지피복 별로는 산림피복에서 그 증가경향이 크게 나타났다.

북한 전역에 대한 6–9월 FPAR의 평균값은 뚜렷한

Fig. 1. Maps showing distribution of input data used in GPP estimation: (a) MOD12Q1 1 km Land Cover, (b) daily minimum temperature (T_{min} , °C), (c) daily short wave radiation (R_s , $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), and (d) daytime-mean vapor pressure deficit (VPD, Pa).

연 변동 특성을 보였다. 2001년과 2000년에 0.727과 0.732로 낮았고, 2003년부터 증가하여 2007년에 0.755까지 증가하였다. 이러한 FPAR의 연간 변동은 기상요소에서 발견한 연 변동 특성과 큰 상관성을 보였다. T_{min} 은 FPAR과 양의 상관성($r=+0.75$, $p=0.02$)을 보인 반면에, R_s ($r=-0.66$, $p=0.05$)와 VPD ($r=-0.82$, $p=0.01$)는 음의 상관관계를 보였다. 온난한 기온, 더 많은 일사량과 덜 건조한 날씨는 식생성장을 촉진하여, 결

과적으로 FPAR 값이 높아질 수 있다. 기상변수와 FPAR 간의 상관성 분석결과는 전반적으로 북한 지역의 식생성장은 일사량 보다는 기온과 건조도에 더 큰 영향을 받는 것으로 해석할 수 있다.

3) 총 일차생산성 추정

MODIS FPAR와 WRF 기상입력자료를 기반으로 추정된 각 해의 GPP 분포는 2000년과 2001년, 2005년

Fig. 2. Maps of 2000-2008 averaged (a) MOD15 original FPAR during June to September, (b) NASA GPP, (c) improved GPP using cloud-corrected FPAR and DAO, (d) MODIS15 cloud-corrected FPAR during June to September, (e) improved GPP using original FPAR and WRF data, (f) improved GPP using cloud-corrected FPAR and WRF data.

Table 1. Areal mean annual GPP ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) for each biome type. The values were averaged from (a) GPP improved in this study and (b) NASA GPP. ENF, DBF, and MF are evergreen needleleaf forest, deciduous broadleaf forest, and mixed forest, respectively.

(a) Improved GPP ($\text{gC/m}^2/\text{yr}$)

	ENF	DBF	MF	Shrub	Crop	Mean
2000	682	816	843	486	400	645
2001	845	1026	1052	551	448	785
2002	911	1097	1122	589	477	839
2003	902	1095	1113	600	489	840
2004	927	1115	1147	604	491	857
2005	852	1006	1043	567	476	789
2006	926	1111	1144	601	498	856
2007	869	1035	1070	576	477	805
2008	927	1127	1146	620	493	863
Mean	871	1048	1076	577	472	809

(b) NASA GPP ($\text{gC/m}^2/\text{yr}$)

	ENF	DBF	MF	Shrub	Crop	Mean
2000	867	995	951	570	409	758
2001	888	1015	985	591	450	786
2002	855	1011	957	605	454	777
2003	934	1068	1024	638	498	832
2004	804	961	899	582	453	740
2005	917	1037	997	640	470	812
2006	927	1063	1013	626	481	822
2007	845	957	926	577	447	750
2008	935	1068	1026	647	480	831
Mean	886	1019	976	608	460	790

에 상대적으로 낮은 GPP를 보였다(Table 1a). 동북부 산간지역에서 낮은 GPP를 보인 반면에, 동부 해안지역과 중부 산간지역에서 다소 높은 GPP 공간분포를 보였다(Fig. 2f). 각 토지피복유형별 평균 GPP는 혼효림(MF)이 $1076 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 로 가장 높았고, 낙엽활엽수

림(DBF)은 $1048 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 로 두 번째 높은 값을 보였다(Table 1a). GPP의 연간 변동은 모든 피복유형에서 유사하게 나타났다. 2000년, 2001년, 2005년에 상대적으로 낮은 GPP를 보였는데, 특히 산림피복형인 혼효림, 낙엽활엽수림, 상록침엽수림에서 큰 폭으로 감소

한 반면에, 상대적으로 농경지, 관목지대에서는 그 감소 폭이 미미하였다.

4) 개선한 GPP와 NASA GPP

각각의 입력자료 개선에 의한 GPP 결과를 NASA GPP와 비교한 결과, 증가 또는 감소의 개선효과가 상이하게 나타났다. 2000–2008년간 토지피복형에 따른 평균 GPP를 산출한 결과(Table 2), 모든 토지피복형에 대하여 구름영향을 보정한 FPAR는 GPP를 증가시켰으나(혼효림, +10.0%; 낙엽활엽수림, +9.7%; 상록침엽수림, +10.8%; 농경지, +2.8%), WRF 기상입력자료는 GPP를 감소시키는 결과를 나타내었다(혼효림, -4.2%; 낙엽활엽수림, -10.4%; 상록침엽수림, -14.9%; 농경

지, -5.5%). 한편 2000–2008년간 GPP 평균지도를 보면, FPAR 개선에 의해 전반적으로 GPP가 증가하였으나(Fig. 2c), 기상자료개선은 GPP의 감소를 초래하였다(Fig. 2e). FPAR와 기상자료를 모두 개선한 결과, GPP가 전반적으로 증가하였으며, 지형효과를 반영한 GPP의 공간이질성 역시 증가한 공간분포특성을 보였다(Fig. 2f).

FPAR와 기상자료를 모두 개선한 GPP는 토지피복형에 따라 NASA GPP와의 차이가 상이하게 나타났다(Table 2). 혼효림의 경우 $976 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 에서 $1076 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 10.2% 증가하였고, 낙엽활엽수림은 $1019 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 에서 $1048 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 2.9% 증가, 상록침엽수림은 $886 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 에서 $871 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 1.7% 감소, 농경지는 $460 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 에서 $472 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 2.6% 증가하였다. 특히, 개선한 GPP는 2000년과 2004년에 큰 차이를 보였다. 이 두 해에 각각 혼효림의 경우 -108 과 $+248 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 낙엽활엽수림은 -179 와 $+153 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 산림지역에서 큰 차이를 보였다(Table 1).

입력자료에 의한 GPP 개선효과는 연간 또는 계절적으로 상이하였다(Fig. 3d–f). FPAR 개선에 의한 영향으로 GPP 원자료와 여름철에 가장 큰 차이를 보였다.

Fig. 3. Time series of 8-day FPAR (upper row) and GPP (lower row, $\text{gC m}^{-2} \text{ 8-d}^{-1}$) for years 2001, 2004, and 2005. (a) Original FPAR, (b) cloud-corrected FPAR, (c) differences between original and cloud-corrected FPAR, (d) NASA GPP, (e) improved GPP, (f) differences between original and improved GPP, respectively.

Fig. 4. Inter-annual GPP anomalies ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) from 2000 to 2008 for (a) the improved GPP and (b) NASA GPP.

한편 Fig. 3f와 같이 연구기간 중 봄철에 개선한 GPP가 NASA GPP보다 작은 값을 보이는 해가 다수 나타났다. 구름효과 제거에 따라 FPAR의 증가하였음에도 GPP가 감소한 결과는 WRF 기상자료의 영향으로 보여진다. 특히 DAO 기상자료가 봄철의 대기건조를 과소평가한 반면에, 고해상도 WRF 기상자료는 각 지역별 봄철 대기 건조도를 보다 높게 추정하여 보다 낮은 GPP를 산출한 결과로 보인다.

2000–2008년간의 아노말리(%) 분석결과, 개선한 GPP는 모든 피복유형에서 2000년에 가장 낮은 값을 보였다(Fig. 4a). 2001, 2005, 2007년도 상대적으로 생산성이 낮은 해였다. 반면에 2004, 2006, 그리고 2008년에 큰 양의 아노말리를 보였다. 개선한 GPP의 아노말리는 NASA GPP 아노말리와 상이한 연간 변동을 보였다. NASA GPP에서는 2004년에 가장 음의 아노말리가, 2003년에 가장 큰 양의 아노말리가 나타났다(Fig. 4b). 2004년과 2005년의 경우 개선한 GPP와 NASA GPP간에 반대의 아노말리 변동특성을 보였다.

4. 토의 및 결론

이 연구에서는 NASA GPP에 비해, 고해상도 일 단위 기상입력자료를 이용하여 지역규모의 상세한 기상 이질성을 반영한 GPP 자료를 생산하였다. 또한 MODIS FPAR자료에 상존하는 구름효과를 보정함으로써 활발한 식생성장기 동안 몬순기후의 특성상 장기간의 구름 때문에 예측 신뢰도가 현저히 떨어지는 NASA GPP의 문제점을 해결하고자 하였다. 본 연구에서 개선한 입력 자료를 기반으로 산출한 GPP는 NASA GPP와 상이한

시공간 분포를 보였다. 전반적으로 개선한 GPP는 NASA GPP에 비해 평균적으로 높은 값을 보였다. 토지 피복유형에 따라 혼효림($+100 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)과 낙엽활엽수림($+24 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$), 농경지($+12 \text{ gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) 등 대부분의 피복유형에서 개선한 GPP가 NASA GPP보다 높게 나타났다. 또한 개선한 GPP와 NASA GPP는 서로 상이한 연간 변동특성을 보였다. 이러한 연구결과는 기상자료의 공간해상도 문제와 FPAR 자료의 구름영향 문제를 내재한 NASA GPP 원자료를 보정 없이 사용할 경우, 한반도의 총일차생산성 나아가 순일차생산성 추정에 상당한 오류가 발생할 수 있음을 보인 것이다.

입력자료개선에 의한 GPP 개선효과는 산림지역에서 크게 나타났다. 특히 단위 면적당 GPP 값이 가장 넓은 산림면적을 차지하는 혼효림에서 가장 큰 차이를 보였고, 낙엽활엽수림에서 두 번째로 큰 차이를 보였다(Table 1). 주로 내지 산악지역과 고지대에 위치한 혼효림의 경우, 새로운 기상자료의 이용에 큰 영향을 받은 것으로 사료된다. 이는 Fig. 1b와 Fig. 1d에서 보았듯이 $T_{\min}$ 과 VPD가 지형의 영향을 크게 받는데 반해, NASA GPP에서 사용하는 DAO 기상자료는 거친 공간 해상도 때문에 이러한 지형의 영향을 제대로 반영하지 못하기 때문에 사료된다. 반면 WRF 기상자료는 DAO 기상자료가 반영하지 못하는 산악지역의 이질성을 모사하기 때문에 산악지역에 우점하는 혼효림의 GPP 추정값에 큰 차이를 유발할 수 있다.

개선한 GPP의 연간변동성을 분석한 결과, 2000년이 매우 낮은 일차생산성을 보였다(Fig. 4a). 특히 산림지역에서 2000년 GPP가 다른 해에 비해 평균 31% 이상 낮게 추정하였고, 농경지 또한 20% 낮은 GPP값을 보였다.

WRF 기상자료를 이용하여 GPP 기상입력자료를 산

출한 결과, T_{min} 과 VPD는 고도에 따른 분포가 뚜렷이 나타났고, R_s 는 사면에 의한 영향이 우세하게 나타났다 (Fig. 1b-d). 각 기상요소의 연 변동 특성분석 결과, VPD와 R_s 의 연간변동 패턴이 유사하게 나타났으며, T_{min} 은 이와 상반된 변동성을 보였다. 이러한 상반된 경향을 각 기상요소들 간의 관계를 통해 살펴보았을 때, VPD는 R_s 의 연 변동을 약 67%까지 설명하였고, T_{min} 에 대해서는 약 65%의 연 변동을 설명하였고, R_s 와는 양의 상관성을, T_{min} 과는 음의 상관성을 보였다. 이와 같은 VPD와 R_s , VPD와 T_{min} 간의 상관관계는 일반적으로 발견되는 경향을 잘 설명하는 결과라고 할 수 있다. 따라서 상세한 공간해상도를 가진 WRF 자료를 이용할 경우, DAO 자료에서는 표현하기 힘든 상세 지역 규모에서의 각 기상요인들간의 연관된 변동양상을 더 잘 모사할 수 있고, 따라서 이들 모든 기상요소에 영향을 받는 GPP 추정에 보다 신뢰도를 높일 수 있다.

각 기상요소들간의 연간 변동성과 GPP 연 변동을 비교한 결과, VPD만이 GPP와 유의한 음의 상관성을 나타내었다($r=-0.8$, $p=0.01$). GPP 산출과정에서 각 기상요소는 상이한 영향을 미친다. 즉 R_s 와 T_{min} 은 양의 효과를, VPD는 음의 효과를 준다(Heinsch *et al.*, 2003). R_s 가 클수록, T_{min} 이 높을수록, VPD가 작을수록 GPP가 커진다. 다른 해에 비해 상대적으로 GPP가 낮았던 2000년의 경우, 비교적 높았던 R_s 보다는 낮은 T_{min} 과 높은 VPD가 GPP 연 변동에 주된 영향을 끼친 것으로 사료된다. 그러나 위에서 발견한 GPP의 연간 변동특성이 입력기상자료와 FPAR 자료의 연간 변동과 어떻게 연관되는 가를 조사하기 위해 상관성 분석을 수행한 결과, GPP와 VPD의 관계에서만 유의한 상관성을 발견할 수 있었다. 이는 GPP가 어느 한 요인에 의해 주되게 영향을 받기보다는 다중 요인에 의해 복합적으로 영향을 받은 결과로 보여진다.

요약하면, 북한지역에 대해 개선한 입력자료를 이용하여 GPP를 산출한 결과, 산림지역에서 높고 농경지에서 상대적으로 낮은 값을 보여, 토지피복이 GPP의 공간 분포를 결정하는 주요한 요인임을 판별하였다. 북한지역의 GPP 연 변동을 조사한 결과, 모든 토지피복에 대하여 2000년과 2001년에 GPP가 낮았다. 또한 NASA GPP와 개선한 GPP 비교를 통해 북한과 같은 지역규모에서 DAO 기상자료와 장기간 구름의 영향을 받은

FPAR 자료를 이용하는 것은 GPP 추정에 큰 불확실성을 야기할 수 있음을 확인하였다. 따라서 신뢰성 높은 GPP를 산출하기 위해서는 보다 상세한 공간해상도의 기상자료와 구름영향을 보정한 FPAR 자료를 입력자료로 이용할 필요가 있다. 본 연구의 결과물인 개선한 GPP 자료는 북한지역 산림과 농업 생산성을 파악하는데 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

하지만 NASA GPP 알고리즘 불확실성의 또 다른 요인인 각 식생형별 생물리학적 계수값에 대한 평가를 수행하지 못하였으며, 후속 연구에서 동북아시아 식생특성을 잘 반영하는 계수값의 개발이 필요할 것으로 사료된다. 또한 이 연구의 최종 결과물로 산출된 GPP의 신뢰도에 대한 평가를 수행하지 못한 점이 이 연구의 큰 한계이다. 향후 한국, 일본, 중국 등에 널리 분포한 플럭스 타워(flux tower) 연구지의 GPP 관측자료와의 비교 평가를 통해 FPAR와 입력기상자료의 개선에 따른 NASA GPP의 개선효과를 정량적으로 평가할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국환경정책·평가연구원의 연구 2011-22의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강신규, 2005. MODIS 엽면적지수 및 일차생산성 영상의 구름 영향 오차 분석: 우리나라 몬순기후의 영향, 한국생태학회지, 28(4): 215-222.
- 강신규, 김영일, 김영진, 2005. MODIS 총일차생산성 산출물의 오차요인 분석: 입력기상자료의 영향, 한국농림기상학회지, 7(2): 171-183.
- 명수정, 김순아, 김지영, 권현한, 2009. 북한의 가뭄재해 취약지 분석 및 남북협력 방안, 한국환경정책·평가연구원.
- Byon, J.Y., J.S. Kim, J.Y. Kim, B.C. Choi, Y.J. Choi, and A. Graetz, 2008. A study on the characteristics of perceived temperature over

- the Korean peninsula during 2007 summer, *Atmosphere*, 18(2):137-146.
- Cao, M., S.D. Prince, J. Small, and S.J. Goetz, 2004. Remotely Sensed Interannual Variations and Trends in Terrestrial Net Primary Productivity 1981-2000, *Ecosystems*, 7: 233-242.
- Davitashvili, T., R. Kvatadze, and N. Kutaladze, 2011. Weather Prediction Over Caucasus Region Using WRF-ARW Model, *MIPRO 2011*, May 23-27, 2011, Opatija, Croatia.
- Friedl, M.A., D.K. McIver, J.C.F. Hodges, X.Y. Zhang, D. Muchoney, A.H. Strahler, C.E. Woodcock, S. Gopal, A. Schneider, A. Cooper, A. Baccini, F. Gao, and C. Schaaf, 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83: 287-302.
- Hwang, T., S. Kang, J. Kim, Y. Kim, D. Lee, and L. Band, 2008. Evaluating drought effect on MODIS Gross Primary Production (GPP) with an eco-hydrological model in the mountainous forest, East Asia. *Global Change Biology*, 14: 1037-1056.
- 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/>.
- Kang, S., S.W. Running, M. Zhao, and J.S. Kimball, 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, W.K., H. Lee, and D.A. Sumner, 1998. Assessing the Food Situation in North Korea, *Economic Development and Cultural Change*, 46(3): 519-535.
- Lynn, B. and Y. Yair, 2010. Prediction of lightning flash density with the WRF model, *Advances in Geosciences*, 23: 11-16.
- Maselli, F., A. Barbati, M. Chiesi, G. Chirici, and P. Corona, 2006. Use of remotely sensed and ancillary data for estimating forest gross primary productivity in Italy, *Remote Sensing of Environment*, 100: 563-575.
- MODIS WIST, <http://wist.echo.nasa.gov/api>.
- Molders, N., 2008. Suitability of the Weather Research and Forecasting (WRF) Model to Predict the June 2005 Fire Weather for Interior Alaska, *American Meteorological Society*, 23: 953-973.
- Monteith, J.L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 281: 277-294.
- Mu, Q., M. Zhao, F.A. Heinsch, M. Liu, H. Tian, and S.W. Running, 2007. Evaluating water stress controls on primary production in biogeochemical and remote sensing based models, *Journal of Geophysical Research*, 112: 1-13.
- Peng, D.L., J. F. Huang, C.X. Cai, R. Deng, and J.F. Xu, 2008. Assessing the Response of Seasonal Variation of Net Primary Productivity to Climate Using Remote Sensing Data and Geographic Information System Techniques in Xinjiang, *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(12): 1580-1588.
- 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.
- Running, S.W., P.E. Thornton, R.R. Nemani, and J.M. Glassy, 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth

- observing system, *Methods in Ecosystem Science*, O.E. Sala, R.B. Jackson, H.A. Mooney, and R.W. Howarth (Eds.), Springer-Verlag, New York.
- Running, S.W., R.R. Nemani, F.A. Heinsch, M. Zhao, M.C. Reeves, and H. Hashimoto, 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production, *Bioscience*, 54: 547-560.
- Sims, D.A., A.F. Rahman, V.D. Cordova, B.Z. El-Masri, D.D. Baldocchi, P.V. Bolstad, L.B. Flanagan, A.H. Goldstein, D.Y. Hollinger, L. Misson, R.K. Monson, W.C. Oechel, H.P. Schmid, S.C. Wofsy, and L. Xu, 2008. A new model of gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 112: 1633-1646.
- Xiao, J., Q. Zhuang, B.E. Law, J. Chen, D.D. Baldocchi, D.R. Cook, R. Oren, A.D. Richardson, S. Wharton, S. Ma, T.A. Martin, S.B. Verma, A.E. Suyker, R.L. Scott, R.K. Monson, M. Litvak, D.Y. Hollinger, G. Sun, K.J. Davis, P.V. Bolstad, S.P. Burns, P.S. Curtis, B.G. Drake, M. Falk, M.L. Fischer, D.R. Foster, L. Gu, J.L. Hadley, G.G. Katul, R. Matamala, S. McNulty, T.P. Meyers, J.W. Munger, A. Noormets, W.C. Oechel, K.T. P. U, H.P. Schmid, G. Starr, M.S. Torn, and S.C. Wofsy, 2010. A continuous measure of gross primary production for the conterminous United States derived from MODIS and AmeriFlux data, *Remote Sensing of Environment*, 114: 576-591.
- Zhao, M., F.A. Heinsch, R.R. Nemani, and S.W. Running, 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set, *Remote Sensing of Environment*, 95: 164-176.