

위성영상으로 분석한 장기간 남한지역 순 일차생산량 변화: 기후인자의 영향

홍지연 · 심창섭[†] · 이명진 · 백경혜 · 송원경 · 전성우 · 박용하

한국환경정책평가연구원

Net Primary Production Changes over Korea and Climate Factors

Jiyoun Hong, Changsub Shim, Mounjin Lee, Gyoungnye Baek, Wonkyong Song,
Seongwoo Jeon and Yongha Park

Korea Environment Institute

Abstract : Spatial and temporal variabilities of NPP(Net Primary Production) retrieved from two satellite instruments, AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer, 1981-2000) and MODIS(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, 2000-2006), were investigated. The range of mean NPP from AVHRR and MODIS were estimated to be 894-1068 $g \cdot C/m^2/yr$ and 610-694.90 $g \cdot C/m^2/yr$, respectively. The discrepancy of NPP between the two instruments is about 325 $g \cdot C/m^2/yr$, and MODIS product is generally closer to the ground measurement than AVHRR despite the limitation in direct comparison such as spatial resolution and vegetation classification. The higher NPP values over South Korea are related to the regions with higher biomass (e.g., mountains) and higher annual temperature. The interannual NPP trends from the two satellite products were computed, and both mean annual trends show continuous NPP increase; 2.14 $g \cdot C/m^2/yr$ from AVHRR (1981-2000) and 6.08 $g \cdot C/m^2/yr$ from MODIS (2000-2006) over South Korea. Specifically, the higher increasing trends over the Southwestern region are likely due to the increasing productivity of crop fields from sufficient irrigation and fertilizer use. The retrieved NPP shows a closer relationship between monthly temperature and precipitation, which results in maximum correlation during summer monsoons. The difference in the detection wavelength and model schemes during the retrieval can make a significant difference in the satellite products, and a better accuracy in the meteorological and land use data and modeling applications will be necessary to improve the satellite-based NPP data.

Key Words : AVHRR, MODIS, satellite, NPP, biomass.

요약 : 본 연구는 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)과 MODIS(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 위성관측을 바탕으로 산출된 남한지역의 장기간(1981-2006년) 순 일차생산량(Net Primary Production, NPP)의 시공간적 변화를 분석하고 그 변화에 영향을 미치는 기후요소와의 상관성을 분석하였다. 남한지역의 AVHRR과 MODIS에서는 연간 순 일차생산량이 AVHRR의 경우 893-1068 $g \cdot C/m^2/yr$ 과 MODIS의 경우 610-695 $g \cdot C/m^2/yr$ 로 나타나고 있으며 두 자료는 통계

접수일(2011년 6월 12일), 수정일(1차 : 2011년 7월 13일), 게재확정일(2011년 7월 15일).

[†] 교신저자: 심창섭(marchell@gmail.com)

적으로 약 $325 \text{ g} \cdot \text{C}/\text{m}^2/\text{yr}$ 의 차이를 보이고 있다. 해상도 등의 차이가 있으나 지상 관측과 비교한 결과 MODIS 센서에 의한 관측이 보다 근접한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 위성관측자료 분석결과 NPP 값은 식생의 밀도가 높은 산림지역 및 연평균기온이 높은 지역에서 큰 것으로 나타났다. 두 개의 위성센서로 산출된 순 일차생산량은 경년변화가 다소 크지만, 각각 장기간에 걸쳐 서서히 증가하고 있는 것으로 나타났으며 1981-2000년 동안 AVHRR에서 매년 평균 $2.14 \text{ g} \cdot \text{C}/\text{m}^2/\text{yr}$, 2000-2006년 동안 MODIS에서 매년 평균 $6.08 \text{ g} \cdot \text{C}/\text{m}^2/\text{yr}$ 만큼 증가하였다. 특히 남서해안 지역은 두 위성관측결과 모두 순 일차생산량의 증가가 상대적으로 높았다. 토지피복 지도와 대조결과 그 이유는 논·밭 등의 관개와 비료사용에 의한 농작물의 생산성 증대와 관계가 있는 것으로 추정된다. NPP값은 월별 강수량 및 평균기온에 밀접한 관계가 있는 것으로 확인되었으며, 특히 남한지역의 여름 몬순시기에서 강수량과 기온이 모두 가장 큰 상관관계를 보이고 있다. NPP 절대값의 차이 외에도 두 센서로 산출된 순 일차생산량과 기후요소와의 상관성 등의 차이는 두 자료의 토양호흡 등을 포함하는 등 위성자료 복원과정 및 관련 모델의 차이에 의해 발생하는 것으로 사료된다. 또한 향후 보다 정확한 순 일차생산량을 계산하기 위해 복원과정에서 기상 실측자료 및 보다 현실적인 토지피복 등을 고려해야 할 것이다.

1. 서론

순 일차생산량 (Net Primary Production, NPP)은 식물의 성장을 통하여 대기 중의 이산화탄소를 흡수하는 양을 의미한다. 식물이 광합성을 통해 이산화탄소를 흡수하여 생산하는 유기물의 총량을 총 일차생산량 (Gross Primary Production, GPP)이라 하고 여기에서 식물의 호흡에 의한 유기물의 소비를 뺀 것이 NPP로 정의된다. 식물의 호흡에는 자신의 생체량을 유지하는 호흡 (Maintenance Respiration, R_m)과 생체량을 합성하여 성장하는 호흡 (Growth Respiration, R_g)이 있으며 이들의 합을 자가영양체호흡 (Autotrophic Respiration, R_a)라고 표현한다. 또한 호흡에는 식물의 낙엽이나 죽은 가지 등에 의해 미생물의 활동으로 이산화탄소를 발생시키는 과정을 종속영양호흡 (Heterotrophic Respiration, R_h)라고 한다. 이와 같이 NPP는 자신의 호흡에 쓰이는 양을 빼고 식물생체량에 저장되는 양을 가리킨다. 생태계에서 탄소수지 지표는 NPP이외에도 순 생태계교환량 (Net Ecosystem Exchange, NEE)으로도 표현된다. NEE는 NPP에서 R_h 을 뺀 값이며 이는 산림에서의 순 탄소수지의 지표로 사용된다(황태희 외, 2003). 탄소수지의 지표가 될 수 있는 순 일차생산량을 전국 규모로 동시에 직접 측정하기에는 시공간적으로 불가능하기 때문에 위성으로 관측된 영상자료를 바탕으로 추정 알고리즘을 통하여 NPP 자료를 복원할 수 있다. 이렇게 위성자료를 통한 순 일

차생산량의 관측은 거시적 규모의 연속적 관찰이 가능하다는 장점이 있다(Zhao *et al.*, 2006). 본 연구에서는 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)와 MODIS(MODERate-resolution Imaging Spectroradiometer) 영상을 활용하여 1981년부터 26년간 남한 지역의 NPP를 분석하였다. 본 연구에서는 기후변화와 관계된 장기간의 남한지역 순 일차생산량 변화와 경향을 분석하기 위하여 AVHRR (1981-2000년) 및 MODIS (2000-2006년)의 NPP 자료를 활용하였으며 식물 순 일차생산량 변화에 영향을 미치는 기후인자(평균기온, 강수량)와의 상관성을 분석하였다. 또한 토지피복과 행정구역별 분석을 수행하기 위해 지리정보기법을 활용하였다.

2. 자료 및 연구방법

1) AVHRR 위성자료의 순 일차생산량 (미국 메릴랜드 대학)

미국해양대기관리국 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 극궤도 위성인 AVHRR 영상과 GloPEM (Global Production Efficiency Model) 모델을 기반으로 (<http://ftp.glc.umd.edu/data/glopem/>) 생성된 자료를 사용하였다. NPP를 산출하기위해 AVHRR 센서의 밴드1-2(0.58-

1.10 μm)에서 가시광선과 근적외선의 반사율을 관측하였고, 밴드 4-5(10.30-12.50 μm)에서 지표기온(K)을 관측하였다. GloPEM은 1987년 미국 Maryland 대학에 의해 전 지구 NPP와 GPP를 산출하기 위한 목적을 가지고 개발하였다. 이는 Hunt *et al.* (1994)의 지상부 생체량 알고리즘 분석에서 지역규모의 연간 누적 순 일차생산량의 경우 평균기온보다 생체량의 호흡량에 영향을 받는다는 이론적 고찰을 근거로 식 (1)-(4)를 통하여 계산하였다(Hunt *et al.*, 1994).

$$APAR = FPAR \times PAR \quad (1)$$

$$GPP = APAR \times \epsilon \quad (2)$$

$$R_f = R_m \times R_g \times R_t \quad (3)$$

$$NPP = GPP \times R_f \quad (4)$$

식생의 광합성유효복사 흡수율 (Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation, FPAR)과 광합성유효복사 (Photosynthetically active radiation, PAR)을 곱하여 식생에 흡수된 광합성유효복사량 (Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR)을 계산하였다(식 1). 일차생산량은 앞에서 계산한 APAR과 빛 이용 효율 값 ϵ (Light Use Efficiency, LUE)으로부터 구하고 연간 누적 총 일차생산량을 계산하였다(식 2). 여기에서 ϵ 는 식생 종류에 의존하며 경험적인 관찰을 통하여 BIOME-BGC (BioGeochemical Cycles) 생태모형을 거쳐 계산되었다 (Thornton *et al.*, 2002; Turner *et al.*, 2003). 식생이 자신을 유지하고 성장할 때 식생의 호흡에 흡수되는 양적 비율은 R_f (Fractional Respiration)으로 나타내었다(식 3). 유지호흡 R_m 은 식물 생체량과 관계된 Hunt의 경험식에 의해 계산되었다 (Prince and Goward, 1995). 그리고 성장호흡 R_g (Growth Respiration)은 0.75의 상수이며 (Hunt *et al.*, 1994), 기온보정인자(Temperature Correction Factor, R_t)는 대기 중의 기온과 캐노피 기온의 차이로부터 계산된다(식 3). 그리고 NPP는 GPP와 R_f 를 곱하여 계산한다(식 4). GloPEM 자료는 NASA의 지구과학자료센터인 Goddard DAAC(Distributed Active Archive Center)에서 위성 탐사 결과를 수집하고 검증 과정을 거쳐 활용된다. 선행연구에 따르면 각각의 GloPEM과

관련된 주요 변수들의 정확성은 실측값의 약 10~30% 수준인 것으로 알려져 있다(Goward *et al.*, 1994; Prince *et al.*, 1998; Goetz *et al.*, 1999). GloPEM의 산출물은 위성관측 주기에 따라 10일간 NPP를 율리우스 일 (Julian day)로 나타내었고 연간 누적 NPP를 계산하였다. 1981-2000년 AVHRR 자료의 해상도는 8×8 km이다. GloPEM는 평균 36%는 결측값(Missing value)을 가지는데 이는 AVHRR 한 개의 센서에서 다수의 변수들을 평가했기 때문에 특정한 픽셀을 구현하는 과정에서 오류로 인한 오차가 발생한 경우와 (1, interference error) 자료의 그리드화 과정에서 경계선에 의한 오차 및 AVHRR의 열적외선 밴드 포화로 인한 기계적 문제가 발생하여 정확한 관측이 제한된 경우 (2)이다 (Prince and Goward *et al.*, 1995).

2) MODIS 위성자료의 순 일차생산량 (미국 몬타나 대학)

Terra 위성은 지구관측시스템(Earth Observing System, EOS)에서 지구에 대한 이해와 예측 능력을 향상시키기 위해 일본 및 캐나다와 공조하여 개발된 첫 번째 위성이다 (<http://terra.nasa.gov/>). 1999년 12월에 발사하여 2000년부터 관측하여 지속적 모니터링을 수행한다. 주요 탑재센서로는 MODIS, ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Japan), CERES(Clouds and the Earth's Radiant Energy System), MISR(Multi-Angle Imaging Spectro-Radiometer), MOPIIT (Measurement of Pollution in the Troposphere, Canada) 등이 있으며, 매일 10:30 오전 궤도 통신망에서 관측 데이터를 전송하였다. Terra 위성궤도는 705 km 고도로 $\pm 55^\circ$ 의 스캔폭을 가지며 결과적으로 약 2330 km의 관측폭을 가진 영상이다. MODIS 위성관측기기는 미항공우주국 (National Aeronautics and Space Administration, NASA)의 지구 관측 위성인 Terra와 Aqua에 각각 탑재되어 있는 주요 관측 센서이고 해양과 육지 및 대기에 모두 적용이 가능한 다목적 특징을 갖는다. 2000-2006년의 NPP는 MODIS센서를 사용한 MOD17 알고리즘을 활용하였다 (Heinsch *et al.*, 2003). MODIS 센서는 36개의 밴드(0.4-14.4 μm)로 구성되며 초기 해상도는 250 m (밴드 1-2), 500 m (밴드 3-7), 1 km (밴

드 8-36)의 공간해상도로 영상을 수집하여 전 지구에 대한 육지와 기온분포, 토지피복, 구름, 에어로졸, 수증기 및 산불 등 관측한 영상자료를 산출하였다. MODIS 영상에서는 대기상태에 따른 처리결과와 질적 정보를 알려주는 QC(Quality Control) 레이어를 함께 제공하여 화소값에 대한 신뢰성을 나타내었다(윤정숙 외, 2009). 본 연구에서 사용한 MODIS 자료는 미국 Montana 대학 NTSG(Numerical Terradynamic Simulation Group) 연구진에 의해 복원한 MODIS/Terra 자료를 사용하였다(http://ntsg.umt.edu/data). 그리고 MODIS 알고리즘을 통해 8일간의 GPP와 광합성 산출물을 나타내는 PsnNET(Net Photosynthesis)을 계산하며 단위는 $g \cdot C/m^2/8day$ 로 나타낸다. 이 알고리즘은 연간 누적 GPP와 NPP 인자들을 계산하는 데에 사용된다. 이 알고리즘은 비옥한 토지와 충분한 관개 조건하에서 NPP는 식생에 흡수된 광합성유효복사량(APAR)이 선형관계를 갖는다는 이론을 바탕으로 개발되었다(Montheith, 1972). 이는 생태계에서 물질 순환을 모사하는 BIOME-BGC(Running and Hunt, 1993) 모형을 기반으로 토지피복(Land Cover, MOD12), 식생의 광합성유효복사 흡수율 FPAR(MOD15), 엽면적지수 LAI(Leaf Area Index, MOD15)를 통해 육지의 식생정보를 제공하며 NPP는 식 (5)-(7)와 같이 계산하였다.

$$GPP = \epsilon \times FPAR \times PAR \quad (5)$$

$$PsnNet = GPP - R_{m-w} \quad (6)$$

$$NPP = \sum_1^{365} PsnNet - (R_{mo} + R_g) \quad (7)$$

여기에서 일차생산량은 식생의 FPAR 및 PAR와 ϵ 의 함수로 매일 계산한다. 식생의 FPAR은 0-1 사이 값을 갖는다. 그리고 광합성 PsnNet은 GPP에서 잎과 미세 뿌리의 유지호흡(R_{m-w})을 빼서 계산한다(식 6). 여기에서 총 호흡량을 계산할 때에는 토양의 미생물이나 소동물의 유기물을 분해한 후 이산화탄소를 방출하는 R_n 는

제외하였다. 총 일차생산량을 구하는 식은 연간 총 광합성량에서 총 유지호흡(R_{mo}) 및 총 성장호흡(R_g)을 빼서 계산한다(식 7). 또한 NPP의 생물학적 다양성을 계산하기 위하여 식생 종류별(Biome type) 광합성량에 따른 최대 성장량은 BPLUT(Biome Proerties of Look-Up Table)의 상대 성장식 및 계수를 이용하여 계산하였다(Heinsch *et al.*, 2003). MODIS 알고리즘에 사용되는 기상 데이터는 NASA의 DAO(Data Assimilation Office)(Atlas and Lucchesi, 2000)에서 구축한 자료이다. 매일 관측하는 기상데이터를 실시간으로 입력하여 ORNL DAAC(Oak Ridge National Laboratory's Distributed Active Archive Center)에서 GEOS-DAS(Goddard Earth Observing System Data Assimilation System) 시스템을 활용하여 GCM(General Circulation Model)로 기상자료의 산출물과 경계 조건을 계산하였다(Atlas and Lucchesi, 2000). 공간해상도는 $1^\circ \times 1.25^\circ$ 이고 MOD17 알고리즘에서는 최저기온, 평균기온, 최고기온, 실제 증기압(Actual vapor pressure, AVP)과 평균 증기압 (VPD)과 총 단파 복사량(Shortwave radiation, SWrad)이 MODIS 알고리즘을 위한 입력 값으로 사용되었다 (Heinsch *et al.*, 2003).

MODIS NPP의 값에 직접 영향을 주는 MODIS의 총 일차생산량 자료(MOD 17 GPP)는 북아메리카 지역의 38개 타워 플렉스 관측값들에 의해 검증되었다(Heinsch *et al.*, 2006). 검증결과 MODIS 자료가 약 20-30% 범위에서 과대평가 하고 있지만 상관계수 0.859 ± 0.173 로 높고 상대오차는 24%로 계산되어 자료의 신뢰도가 비교적 높은 수준이다. 본 연구에서는 2000-2006년의 연간 누적 순 일차생산량이며 공간해상도는 0.8×0.8 km의 자료를 사용하였다. Table 1에서 두 위성관측에 기반한 NPP 자료들의 개요를 나타내고 있다.

구름에 의한 시그널의 불확실성은 위성기반 NPP 자료를 복원하는 데에 가장 큰 제약 조건 중 하나이다. 본

Table 1. Description of AVHRR and MODIS data

위성	센서	산출물	알고리즘	공간해상도	연간 데이터	기간	출처
NOAA	AVHRR	NPP	GloPEM	8×8 km	20	1981-2000	Univ. of Maryland
Terra	MODIS		MOD17A3 (Version 005)	0.8×0.8 km	7	2000-2006	Univ. of Montana (NTSG)

연구에 사용된 자료는 복원시 구름픽셀을 제거하고 구름픽셀 주변의 같은 토지피복의 구름이 없는 픽셀 값(GPP 혹은 FPAR/LAD)을 대신 사용하였다(Heinsch *et al.*, 2003). 장기간 구름픽셀이 존재하는 경우는 이전 주간의 픽셀 값으로 대체하였다. 따라서 구름존재하의 복원자료의 오차는 상대적으로 크다.

3) 기상자료 및 토지피복도

본 연구를 위하여 기상자료는 국립기상연구소에서 생성된 자료를 지리정보기법 중 공간보간법을 활용하여 전국자료로 구축하였다. 이 자료의 특징은 기상청 지상 관측소 75개에서 1971-2000년 사이 월 평균기온 및 월 누적 강수량 데이터를 사용하여 기상도면으로 작성한 것이다(국립기상연구소, 2005). 본 연구에서는 2000-2100년 사이 월별 기상자료를 예측한 1×1 km 해상도의 자료를 사용하였다. 계산된 기상자료는 실측값을 반영하였고 물리적 연속성을 가지므로 실측값에 준하여 사용하였다. 순 일차생산량 변화의 식생 분류별 차이를 파악하기 위해 사용된 토지피복지도(Land Cover Map)는 환경부(2007) 공간정보서비스에서 인공위성이 촬영한 영상을 이용하여 지표면의 상태를 표현하기 위하여 구축한 자료를 사용하였다. 토지피복분류(Land Cover Classification)는 원격 탐사 자료를 활용하여 숲, 초지, 콘크리트 포장과 같은 지표면의 물리적 상황을 분류하였다. 이러한 토지피복지도는 현재 상태를 가장 잘 반영하고 있어 현실을 반영한 여러 모델링의 기초자료로 활용되어 정책수립의 효율성 및 과학적 타당성을 높이는 기여를 하고 있다(환경부 공간정보서비스). 본 연구에서는 중분류에 포함되는 논, 밭, 침엽수림, 혼효림 및 활엽수림을 사용하여 순 일차생산량의 시공간적 분포와 토지피복과의 연관성을 분석하였다.

4) 자료의 비교

남한지역에서 장기간 순 일차생산량의 변화량을 분석하기 위하여 1981-2000년 사이에는 AVHRR 관측자료와 2000-2006년 사이에는 MODIS 관측자료를 사용하여 시계열 분석을 실시하였다. 또한 순 일차생산량과 기후인자들(평균기온 및 강수량)의 상관분석을 위하여 7월 평균기온과 7월 누적강수량의 자료 형태를 연 평균기온 및 연 누적강수량으로 계산하여 사용하였다. 순 일

차생산량은 성장기간에 집중적으로 발생하게 되므로 연 평균 자료와의 상관성은 비교적 낮게 나타나므로 (그림 생략) 강수량과 기온이 평균적으로 가장 높은 7월의 값을 사용하여 상관분석을 실시하였다. 자료간의 공간적 해상도가 다르기 때문에 AVHRR(8×8 km)과 기후인자(1×1 km)를 비교할 때는 AVHRR 격자 내에 속하는 모든 기후인자의 같은 기간 동안의 평균값을 계산하였다. 이렇게 샘플링된 8×8 km 해상도의 기후인자들을 같은 해상도의 AVHRR 자료와의 상관성을 계산하였다. 반면에 MODIS(0.8×0.8 km)영상과 기후인자(1×1 km)를 비교할 때는 상대적으로 큰 기후인자 격자 내에 속하는 모든 순 일차생산량 자료를 샘플링 한 후 기후인자들과(1×1 km)의 상관성을 계산하였다. 그리고 남한 지역의 16개의 광역 지자체 (서울특별시, 부산광역시, 대구광역시, 인천광역시, 광주광역시, 대전광역시, 울산광역시, 경기도, 강원도, 충청북도, 충청남도, 전라북도, 전라남도, 경상북도, 경상남도, 제주특별자치도)별 NPP의 변화와 토지피복별 NPP의 변화를 분석하기 위해 지리정보분석 기법(GIS MASK)을 활용하여 계산하였다.

3. 연구결과

1) AVHRR 위성자료의 순 일차생산량(NPP)

Fig. 1 (a)에서 남한지역의 1981-2000년 동안 AVHRR에서 복원된 순 일차생산량의 연평균 변화추이를 보여주고 있다. Fig. 1 (a)에서 보듯이 장기간 NPP는 연도별 편차가 뚜렷하지만 서서히 증가하였다. 20년 동안 선형회귀분석을 했을 경우 NPP는 매년 평균 2.14 $g \cdot C/m^2/yr$ 만큼씩 상승하였고 평균 NPP는 970 $g \cdot C/m^2/yr$ 으로 계산되었다. 남한에서 NPP 경년변동의 범위는 1988년도와 1989년도에서 각각 최저치 893 $g \cdot C/m^2/yr$ 와 최고치 1068 $g \cdot C/m^2/yr$ 로 나타났다 (STD=46.03). Table 2에는 1981-2000년 동안 연간 누적 NPP와 5년치를 평균한 NPP 및 각각의 표준편차를 계산한 결과 1996-2000년 사이에 986 $g \cdot C/m^2/yr$ 으로 가장 높게 나타났다. 이는 지구 온난화로 인해 산림에서 식생의 활발한 성장으로 이산화탄소의 흡수능이

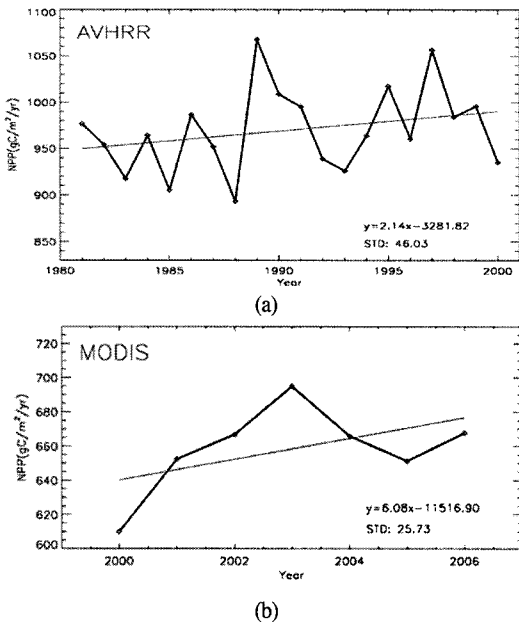


Fig. 1. (a) Interannual variability of Net Primary Production from AVHRR over Republic of Korea and (b) Interannual variability of NPP from MODIS over Republic of Korea.

Table 2. Statistics of AVHRR derived NPP

Year	5-year mean NPP (g · C/m ² /yr)	Annual NPP (g · C/m ² /yr)	STD
1981	943.63	976.77	166.80
1982		954.25	162.67
1983		917.68	142.88
1985		964.12	147.63
1985		905.34	173.84
1986	981.68	986.55	205.34
1987		951.95	163.75
1988		893.26	195.41
1989		1067.71	186.55
1990		1008.91	179.93
1991	968.26	995.30	159.39
1992		938.93	142.98
1993		925.97	137.50
1994		963.75	156.24
1995		1017.34	189.74
1996	986.37	960.45	170.63
1997		1056.33	185.85
1998		984.08	165.57
1999		995.90	173.13
2000		935.12	169.86

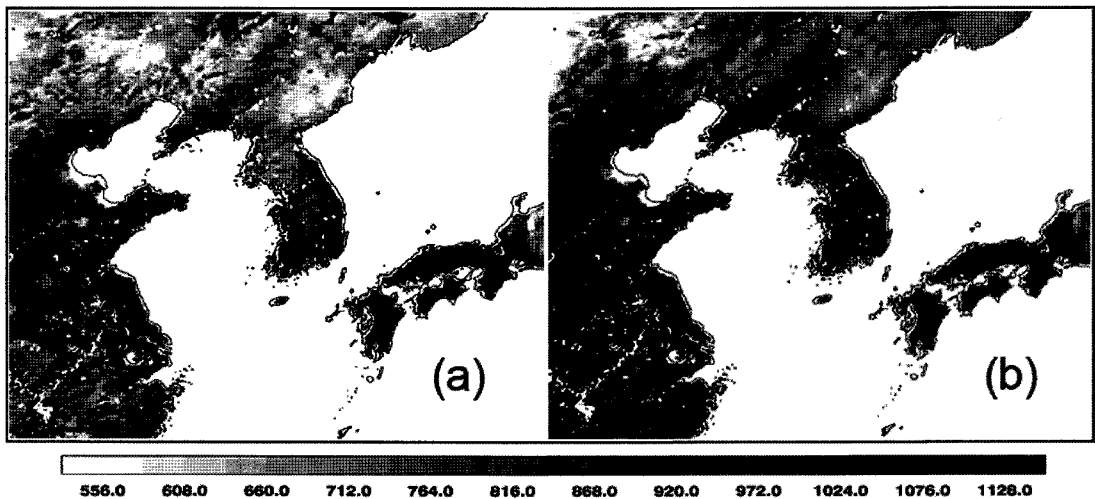


Fig. 2. NPP distribution from AVHRR (a) Minimum year of 1988 and (b) Maximum year of 1989 (Unit: g · C/m²/yr).

증가한 것으로 보인다. Fig. 2는 NPP의 값이 최고치와 최저치를 보인 년도 (1989년, 1067.71 g · C/m²/yr, 1988년, 893.26 g · C/m²/yr)를 나타내었다. Fig. 3에서는 동아시아 지역에서 NPP의 증감분포를 설명하고 있다. 그림에서 보이듯 20년간 NPP가 남한의 대부분 지역에서는 증가하고 있다. 같은 그림에서 중국동부의

경우 상하이와 주변 지역의 NPP가 감소하고 있다. AVHRR의 장기간 변동자료를 통해 20년간 남한지역의 NPP는 대체적으로 증가하였으나 연간 변화량은 매우 큰 것을 알 수 있다.

Table 3. Annual variability of MODIS Net Primary Production changes over Korea

Year	mean NPP ($g \cdot C/m^2/yr$)	STD
2000	610.00	210.39
2001	652.40	205.05
2002	666.80	218.50
2003	694.90	196.33
2004	665.90	220.20
2005	651.40	210.09
2006	667.70	203.20

2) MODIS 위성자료의 순 일차생산량(NPP)

2000년부터 2006년 사이의 남한지역의 NPP를 분석하기 위해 Terra에 탑재된 MODIS 자료를 사용하였다. Fig. 1 (b)에서 남한의 MODIS NPP는 $600-700 g \cdot C/m^2/yr$ 의 범위를 보이고 있다. NPP 경년변동의 범위는 2000년도와 2003년도에서 각각 최저치 $610 g \cdot C/m^2/yr$ 와 최고치 $695 g \cdot C/m^2/yr$ 를 보였다 (STD=25.73). Table. 3 에는 2000-2006년 동안에 각각 연간 누적 NPP와 표준편차를 계산하였고 Fig. 4에서는 NPP의 최저년도 (2000년, $610.00 g \cdot C/m^2/yr$)과 최고년도 (2003년, $694.90 g \cdot C/m^2/yr$)의 공간분포를 보여주고 있다. 선형회귀분석으로 최근 남한의 NPP 추

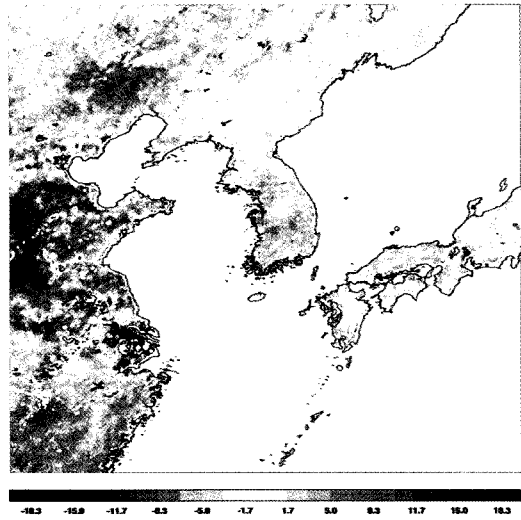


Fig. 3. The spatial distribution of NPP trends (1981-2000) over the East Asia estimated from AVHRR-GloPEM(Unit: $g \cdot C/m^2/yr$).

이를 분석한 결과 매년 평균 $6.08 g \cdot C/m^2/yr$ 만큼씩 증가하였고 평균 NPP는 $658 g \cdot C/m^2/yr$ 으로 파악되었다. AVHRR 자료와 비교할 경우 약 $400 g \cdot C/m^2/yr$ 정도 낮은 수치다. 이처럼 큰 차이가 생기는 이유는 각각의 영상에서 순 일차생산량을 복원시 생기는 알고리즘과 활용되는 모형의 차이, 관측센서의 파장대역의 차이가

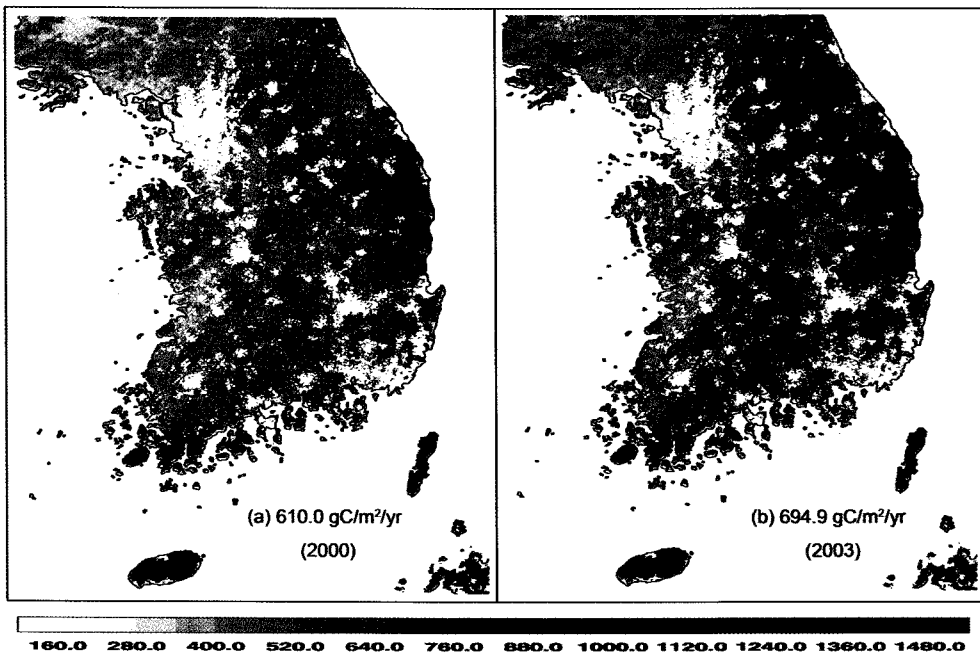


Fig. 4. NPP distribution from MODIS (a) Minimum year of 2000 and (b) Maximum year of 2003(Unit: $g \cdot C/m^2/yr$).

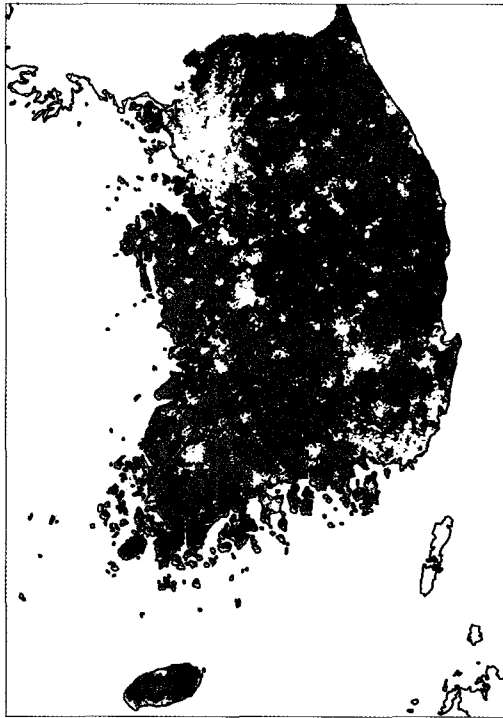


Fig. 5. The spatial distribution of NPP trends (2000-2006) over Republic of Korea estimated from MODIS(Unit: $g \cdot C/m^2/yr$).

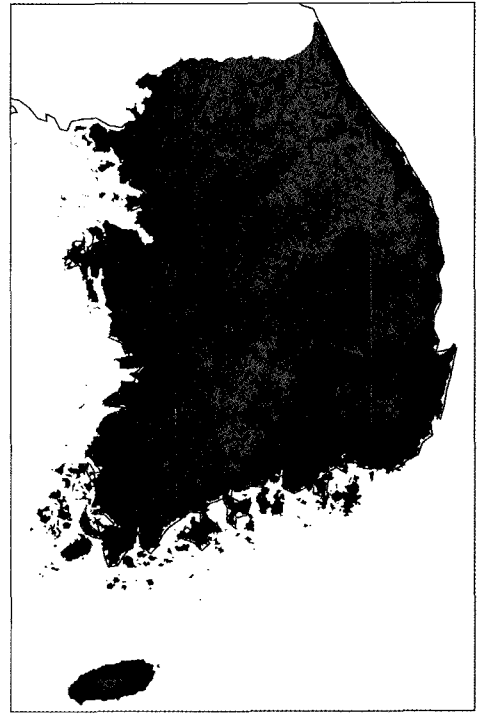


Fig. 6. Distribution of annual mean temperature(2000 - 2006) (Unit: $^{\circ}C$).

원인일 것으로 판단된다 (제2장 참조). 또한 Fig. 5는 남한지역에서 2000-2006년 사이 NPP 증감을 계산하였다. Fig. 6에서 보듯이 남한의 경우 남동해안과 남서해안 지역이 상대적으로 높은 수치를 나타내고 있다. 이것은 MODIS 알고리즘이 전지구나 광역규모에 비해서 지역규모의 경우 고해상도의 토지의 특징과 기상 입력정보의 오류로 인한 영향과 관련 있을 수 있다(강신규 외, 2005; Zhao *et al.*, 2006). 또한 NPP의 증가율은 남동해안과 서남지역에서 증가하는 경향을 나타내는데 Fig. 6에서 보여주듯이 이는 7년간의 높은 연평균 기온과 연관성이 있는 것으로 보인다. 거시적 스케일의 위성관측 자료에 근거한 NPP 자료와 식생종류마다 큰 차이를 보이는 지상 관측자료와의 직접적 비교는 기술적으로 간단하지 않다. 또한 매우 제한된 한반도의 식생 타워관측소의 측정자료로 위성기반의 장기간 자료와의 비교는 본 연구의 영역에 포함하지 않는다. 그러나 기존의 식물군락에 따른 지상측정 결과와 비교해 보았을 때, 군락별로 큰 차이를 보이고 있으나, 대부분의 주요 식생 군락

에서 약 $700 g \cdot C/m^2/yr$ (2007-2009)이하의 NPP를 보이고 있는 것으로 보아 (환경부, 2010) MODIS 자료의 신뢰도가 다소 높은 것을 가늠할 수 있다.

(1) 행정구역의 순 일차생산량 변화

본 연구에서는 AVHRR의 공간해상도 ($8 \times 8 km$)가 행정구역별로 정확하게 샘플링 하기에는 다소 크기 때문에 보다 작은 공간해상도를 가진 최근의 MODIS 자료로 행정구역별 분석을 수행하였다. 그 결과 남한의 16개 지역에서 행정구역별로 순 일차생산량의 변화를 분석한 결과 모든 지역에서 증가하였고 지역적 차이가 뚜렷하게 나타났다(Table 4). 2000-2006년까지의 평균 이산화탄소 흡수가 가장 높게 평가된 곳은 제주도이고 $1353.7 g \cdot C/m^2/yr$ 으로 연간 $140.9 g \cdot C/m^2/yr$ 만큼 증가하였다. 남한의 평균 NPP보다 크게 높은 값으로 나타났다. 이는 제주도의 지역적 기후조건에 의해 식생의 성장이 상대적으로 활발해 NPP가 더욱 증가한 것으로 보인다. 또한 울산광역시와 경상북도, 부산광역시도,

Table 4. The MODIS NPP distribution over the local government(estimated by GIS technique)

(Unit: g · C/m²/yr)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Average	STD	Growth rate	Rank
서울특별시	563.76	620.66	617.17	642.10	594.89	627.69	610.98	611.04	25.39	4.77	11
부산광역시	663.84	721.97	726.23	738.83	740.93	679.22	704.53	710.79	29.72	1.83	4
대구광역시	605.80	667.03	675.88	720.30	674.49	613.13	684.50	663.02	40.45	4.53	7
인천광역시	447.81	471.35	467.21	500.43	472.04	510.47	480.38	478.53	21.09	6.46	16
광주광역시	533.94	548.02	601.89	611.25	591.25	573.58	575.21	576.45	27.99	5.87	13
대전광역시	578.40	614.92	622.94	680.81	621.02	600.00	630.19	621.18	31.51	4.41	10
울산광역시	761.49	817.19	833.02	845.13	855.31	805.86	832.37	821.48	31.14	7.58	2
경기도	538.61	592.63	589.07	622.06	579.42	603.27	596.24	588.76	25.80	6.59	12
강원도	598.10	685.62	692.32	729.22	654.12	643.80	679.42	668.94	41.71	4.36	6
충청북도	586.17	636.88	636.62	681.95	626.29	614.63	638.49	631.58	28.91	3.65	9
충청남도	528.41	541.85	545.88	596.21	561.28	563.12	555.95	556.10	21.44	5.02	15
전라북도	529.55	557.80	571.55	612.28	576.52	563.44	579.67	570.12	25.01	5.95	14
전라남도	633.15	650.93	701.60	712.98	704.26	686.73	691.92	683.08	29.73	8.95	5
경상북도	672.58	738.03	746.55	778.12	745.87	688.55	748.31	731.15	37.07	4.55	3
경상남도	606.52	649.54	668.26	708.21	670.73	623.43	668.06	656.39	33.64	4.82	8
제주특별자치도	1301.59	1287.50	1411.15	1311.57	1395.20	1417.02	1352.07	1353.73	54.63	14.09	1

전라남도 및 강원도에서도 NPP가 821, 731, 711, 683, 669 g · C/m²/yr으로 평균보다 높게 계산되었다. 이는 상대적으로 높은 기온분포 (Fig. 6) 및 산림비율 (Fig. 7)과 관련이 있다. MODIS NPP 자료는 수도권 등 주거 및 대도시지역에서 낮은 식생피복 정보로 인해 대부분 자료복원에서 제외되었다. 특히 MODIS의 토지피복과 관련된 LDOPE(Land Data Operational Product Evaluation)에서 식생지역과 주거지역이 주어진 해상도(1×1 km)에서 혼합되어 있는 경우가 많아 정확히 인식하기가 곤란하여 복원과정에서 대부분 제외되었다 (Heinsch *et al.*, 2003). 따라서 Table 4에 나타난 대도시 지역의 NPP 정보는 그 대도시의 대표성을 나타낸다고 볼 수 없다. NPP의 증가 경향은 호남지역이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다 (-6.0 gC/m²/yr 이상). 이는 이

지역이 타지역에 비하여 경작 (논밭)지역이 많이 분포하고 있어 병해충 관리 및 태풍이나 호우에 의한 대비뿐 아니라 수리시설이 잘 갖추어져 있어 (예, 삼교천방조제, 금강하굿둑) 이에 따른 작물의 높은 생산성과 관계된 것으로 판단된다(정영상 외, 1999). 16개의 광역 지자체별 순 일차생산량의 평균값과 증가율 및 표준편차에 대한 내용은 Table 4에 나타내었다.

(2) 토지종류와 순 일차생산량 변화

토지피복분류(Land Cover Classification)는 원격탐사 자료를 활용할 수 있으며 숲, 초지, 콘크리트 포장과 같은 대지 표면의 물리적 상태를 분류한 것이다(신사철 외, 2008). 본 연구에서는 환경부의 중분류 토지피복 지도에 포함된 농업 및 산림에 관련된 5가지 토지 종류

Table 5. MODIS NPP classified by land surface type(Unit: g · C/m²/yr)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Average	Growth rate	STD
논	511.33	538.57	549.40	580.93	568.67	555.18	562.98	552.44	7.41	22.68
밭	597.98	634.79	650.71	678.87	657.55	637.49	656.09	644.78	6.66	25.27
침엽수림	651.70	705.28	723.43	756.88	711.55	681.58	715.95	706.62	4.77	33.08
혼효림	647.28	706.06	723.43	758.99	705.92	670.81	713.24	703.68	3.92	36.09
활엽수림	643.36	699.80	716.25	752.59	696.18	676.12	706.94	698.75	4.40	33.81

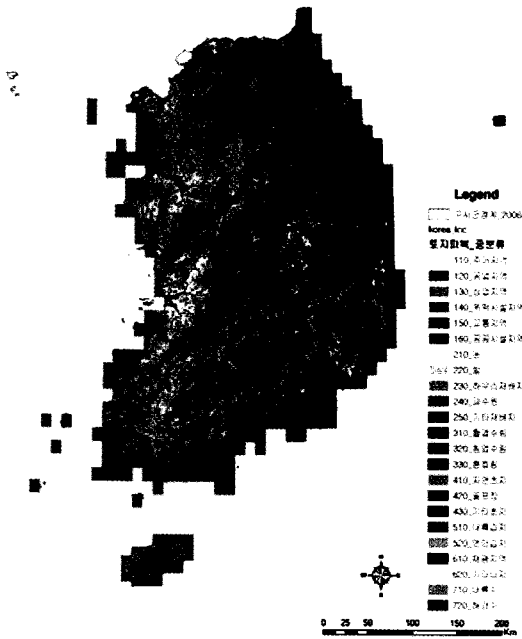


Fig. 7. The land cover distribution(Ministry of Environment, 2007).

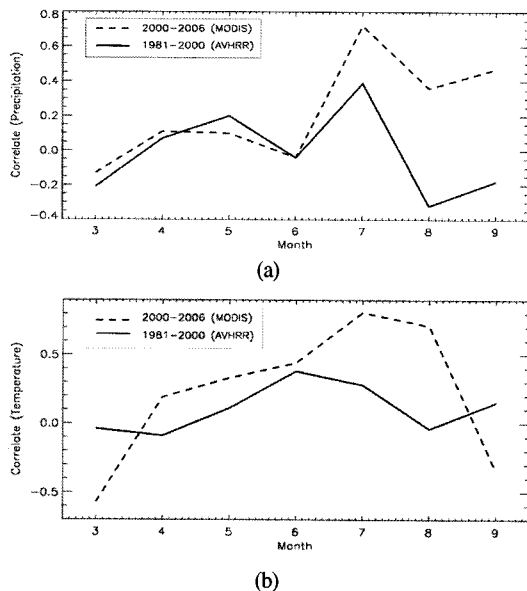


Fig. 8. (a) The monthly correlation between NPP and monthly cumulative precipitation during the growing season (March-September) over Republic of Korea and (b) The monthly correlation between NPP and monthly surface temperature during the growing season(March-September) over Republic of Korea.

항목과 비교분석하였다(Fig. 7). 그 결과 논과 밭에서 매년 평균 순 일차생산량은 낮지만 상대적으로 각각 7.41 $g \cdot C/m^2/yr$ 과 6.66 $g \cdot C/m^2/yr$ 으로 매우 큰 증가율을 나타냈다(Table 5). 행정구역별 분석과 마찬가지로 이는 논과 밭에서 식생이 성장할 때 인위적 관개 및 비료사용으로 상대적으로 빠르게 증가한 것으로 보인다. 이는 충청 및 전라도 지역의 높은 NPP 증가율을 뒷받침 하는 것이다. 식생의 탄소수지와 관련하여 수종에 따라 이산화탄소의 흡수능, 즉 기후변화에 따른 숲의 잠복력에 대한 연구도 주목받고 있다(Baldocchi *et al.*, 2001). 남한에서 큰 면적을 차지하는 산림인 활엽수림, 침엽수림, 혼효림이 농경지인 논과 밭의 지역에 비해 평균 NPP가 높은 값을 나타냈다. 농경지는 평균 599 $g \cdot C/m^2/yr$, 산림지는 평균 703 $g \cdot C/m^2/yr$ 를 나타냈으며 특히 침엽수림에서 탄소 순 일차생산량이 높게 계산되었다. 이런 차이는 농경지의 경우 매년 농작물의 수확과 관련된 바이오메스의 제거와 관련이 높을 것으로 사료된다.

(3) 식생의 성장기간과 순 일차생산량의 변화

기후인자는 NPP에 영향을 주는 절대적 요소이며 이미 위성자료의 복원과정 등에서 기상요소는 반영되고 있다. 본 연구에서는 장기간 순 일차생산량의 변화와 기후변화 인자와의 상관성을 분석하였다. 이산화탄소 흡수능이 가장 활발한 시기를 분석한 결과 식생의 성장기간(3-9월)에 광합성이 주로 이뤄지기 때문에 월별 평균 기온 및 월별 누적 강수량을 연 누적자료인 NPP와 상관성을 분석한 결과 다음의 경향성으로 요약할 수 있다.

강수량의 경우 7월에서 NPP와 가장 높은 상관성(R)을 가지며 AVHRR 및 MODIS에서 각각 0.39, 0.72을 나타냈다. 강수량의 상관성은 평균적으로 몬순의 영향이 뚜렷한 여름에 가장 높은 것을 확인할 수 있었다(Fig. 8 (a)). 그러나 평균치에서 많이 벗어난 경우에 대한 원인은 급격한 기후변화나 극심한 가뭄(2000년) 등 기상학적 요인으로 인해 다른 해에 비해 순 일차생산량이 낮아질 수 있다. 또한 Fig. 8 (a)에서 시계열 곡선의 상관성이 7월에 최대값을 가지는 반면 8월에 급격히 감소하는데 이러한 몬순기간 중의 낮은 일관성은 높은 구름 영향으로 사료된다. 기상청에서 측정된 실측 자료를 토대로 1982-2008년 사이 계절별 운량을 분석하면 여름철 운량이 상대적으로 연 평균치보다 약 27 % 높았다(조덕기

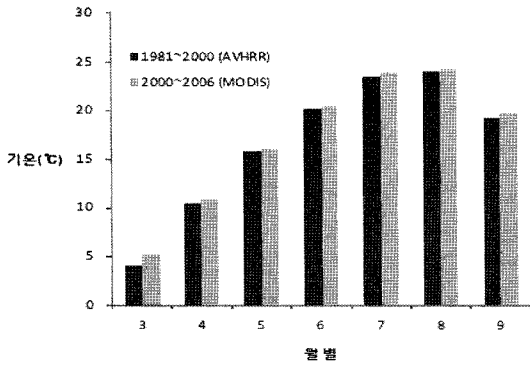


Fig. 9. The monthly mean temperature for each data period.

외, 2010). 우기에 해당하는 6월과 8월 사이에 구름에 인한 영향이 몬순 기간에 집중하여 나타나며, 운량은 위성 자료의 복원시 오차를 증대시키는 요인으로 작용한다(강신규, 2005). 이는 보통 7-8월에 몬순에 의해 구름이 많은 대기환경과 복잡한 지표에서의 구름 및 안개의 영향을 받기 때문에 촬영된 영상이 지표 환경을 잘 표현하지 못하는 것으로 사료된다. 구름 영향은 앞서 설명된 구름증가에 따른 자료의 인위적 처리에 의한 불확실성 증가를 유발시킨다(Heinsch *et al.*, 2003).

월평균기온과 NPP의 상관성의 경우 AVHRR 자료는 6월에 0.38의 상관성(R)을 정점으로 7,8월에 감소하지만 MODIS 자료는 7월에 0.81로 정점에 이르고 8월에 0.75로 소폭 감소함을 볼 수 있다(Fig. 8 (b)). 광합성이 온도와 광량에 모두 의존하므로 7,8월의 유사한 월평균기온을 감안하면 (Fig. 9) MODIS의 자료가 보다 물리적으로 타당성이 높은 관계를 보여주는 것으로 보인다. MODIS NPP 자료는 월평균기온과 누적강수량의 7월 평균의 이상치(Anomaly)와의 상관관계에서도 AVHRR보다 뚜렷이 높은 상관관계를 보이고 있다 (MODIS(2000-2006): 0.81(기온), 0.72(강수), AVHRR(1981-2000): 0.28(기온), 0.39(강수), 그림생략). 앞서 설명한 바와 같이 MODIS NPP 자료는 그 절대값의 크기가 지상 실측값과 보다 유사한 점과 기후인자와의 일관된 상관성을 보여주기 때문에 AVHRR 자료보다 사실적인 것으로 판단된다. 이는 비교적 MODIS의 높은 공간해상도와 분광밴드의 차이와 개선된 복원과정과 관련이 있다(Zhao *et al.*, 2005).

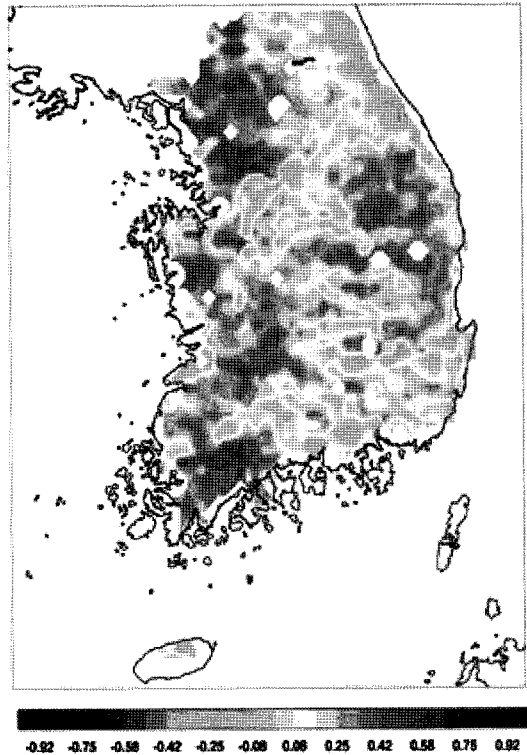


Fig. 10. The distribution of the correlation between monthly temperature(July, 1981-2000) and corresponding AVHRR NPP data.

(4) 기후인자와 NPP와의 상관성 공간 분포

본 연구에서는 7월의 평균기온과 월 누적 강수량 자료를 바탕으로 연간 AVHRR NPP 자료 (1981-2000)와 연간 MODIS NPP 자료 (2000-2006)와의 지역적 상관관계 분포(R)를 구하였다. 강수패턴과 NPP와의 상관관계는 위성센서나 지역적 차이 없이 모든 지역에서 높은 양의 상관관계를 (0.4-0.9) 보이고 있다 (그림 생략). Fig. 10에서 기온의 경우 AVHRR은 7월의 평균기온과 전체적으로 양의 상관관계 (0.2-0.7)를 보이고 있지만 그 분포양상이 연평균 기온분포와 유사함 (Fig. 6)을 알 수 있다(Fig. 8 (b)). 이는 20년간의 장기 위성기반 자료와의 상관관계이므로 기후학적으로 의미가 있다고 볼 수 있다. 또한 약한 음의 상관관계를 보이는 지역은 연평균 기온이 상대적으로 낮거나 높은 고도 지역이다(산맥분포 지역). MODIS 자료의 경우 7월 평균 기온과 지역에 관계없이 높은 양의 상관관계 (대부분 R > 0.5)를 보였다. 그러나 연평균 기온과 강수량 자료와의 상관관

계는 대부분 지역에서 볼 수 없는 것으로 나타나, 기후 변화 인자와 NPP와의 상관관계는 생장기간이 활발한 기간에만 뚜렷한 것을 알 수 있다.

4. 제약 조건 및 오차의 요인

위성자료를 활용한 남한지역의 순 일차생산량을 분석한 과정에서 다음과 같은 제약조건이 존재한다. 먼저 기상자료를 수집 할 때 75개 관측지점에서 기상모형에 의한 통계적 다운스케일링을 통한 자료를 사용하여 전 지역의 분포 (1×1 km) 를 추정하기 때문에 자료의 오차를 포함한다. 그리고 MODIS 기상자료 (최저기온, 평균기온, 최고기온, VDP, SWrad)를 수집하는 DAO의 공간해상도는 1°×1.25°이고 MODIS 알고리즘의 입력 값으로 사용되기 때문에 수 km 단위의 상세 공간분포를 분석하는 데에 한계가 있다 (강신규 외, 2005). 3.3절에서 언급했듯이, 우리나라는 몬순 기후의 여름철 집중강우영향을 받으므로 위성자료 복원시 온량은 오차를 증대시키는 원인이 되고 있다. MODIS NPP 알고리즘에서는 육지를 토지피복(Land cover, MOD 12)에서 산정된 지역으로 구분하여 지역별 순 일차생산량 계산을 사용하였으나 남한지역에 관련된 MOD 12의 토지피복은 16개의 통계적 분류와 환경부 자료의 토지피복은 중분류는 23개로 분류체계가 상이해서 생기는 오차가 있다. 특히 토지피복지도와 비교할 경우 원시 영상으로 SPOT-5위성을 사용하였기 때문에 센서 특징 차이에 인한 영향도 포함할 수 있다. SPOT-5 위성은 0.50-0.71 μm 이므로 AVHRR 및 MODIS 센서와 다소 차이를 보였다. 또한 NPP 복원에 사용되는 기상자료가 고해상도의 실측값과 차이가 있기 때문이다(Zhao et al., 2006). 따라서 NPP를 산정하기위해 Land Surface Model을 사용하여 식생 호흡량을 산정할 시에도 기상장의 공간해상도 문제 등 모형의 입력자료에 기인한 오차도 향후 개선할 필요가 있다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 1981-2006년 위성관측 AVHRR과

MODIS를 바탕으로 남한지역의 순 일차생산량 변화를 토지피복지도와 비교분석하였고, 공간정보 분석을 활용하여 16개의 행정구역별로 분석하였다. 또한 순 일차생산량 변화에 영향을 미치는 기후인자 중에서 가장 중요한 평균기온과 강수량과의 상관관계를 계산하였다. 1981-2000년 AVHRR 관측자료를 분석한 결과 매년 2.14 g·C/m²/yr만큼씩 상승하였고 평균 NPP는 970 g·C/m²/yr으로 파악되었다. 그리고 2000-2006년 MODIS 관측자료를 분석한 결과 매년 6.08 g·C/m²/yr 만큼씩 증가하였고 평균 NPP는 658 g·C/m²/yr으로 파악되었다. NPP의 산출값에서 AVHRR과 MODIS의 차이가 나는 이유는 순 일차생산량 추출시 생기는 알고리즘과 해상도 차이, 센서의 파장대역, 모형에 의존하는 호흡량의 추정법 등의 차이로 인하여 생기는 것으로 판단된다. 토지피복지도와 비교분석한 결과 순 일차생산량의 절대값은 바이오메스가 큰 산림지역(활엽수림, 침엽수림, 혼효림)에서 높았지만 성장률 증가는 논밭 지역에서 더 높은 것으로 나타났다. 지역적 분포를 분석한 결과 호남 지역에서 높은 순 일차생산량을 나타내었다. 이는 남서지역이 타지역에 비하여 곡물 재배지와 평야지가 많으므로 관계시설 등 농업 생산을 위한 환경 때문인 것으로 판단된다. 또한 순 일차생산량 변화에 영향을 미치는 기후인자 중에서 상관성이 높은 7월 평균기온과 누적강수량을 각각 이상(Anomaly)현상 비교한 결과 AVHRR 보다 MODIS에서 높은 상관성을 보였다. 이는 공간적 상관관계에서도 비슷한 양상을 보였다. 기상인자와의 높은 상관성, 그리고 지상 관측치와의 간접비교를 근거로 MODIS 자료가 한반도에서 보다 현실적인 NPP를 보여주고 있는 것으로 사료된다. 그러나 기후변화로 인한 생태계의 순 탄소수지 변화를 가능하기 위해서는 기후변화에 따라 생태계의 호흡량도 증가하기 때문에 순 생태계교환량(NEE)의 고해상도 평가를 위한 지상에서의 순 생태계교환량 관찰이 장기적으로 반드시 필요하다. 또한 장기간 지상타워 관측과 원격탐사로 도출된 자료와의 직접적 검증연구도 병행할 필요가 있다. 위성자료 복원시 한반도의 구름 등 기상요소 처리기술의 발전과 현실적인 피복분류의 도입등도 해결과제이다. 이는 향후 식생의 종류와 지역적 지형과 기상을 반영한 위성기반의 생태계 순 일차생산량 자료의 신뢰도를 높일 수 있는 기회가 될 것이다.

사 사

본 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발사업 (Eco-Technopia 21 Project)”으로 지원받은 과제이며, 이 연구를 위해 지상관측정보를 자문해 주신 이창석, 주승진, 김용원 박사님과 영상자료를 자문해주신 홍진규, 정수종 박사님께도 감사의 말씀을 드린다.

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.
- 국립기상연구소, 2005. 기후변화협약대응 지역기후시나리오 활용기술 개발(I), 국립기상연구소.
- 신사철, 백승철, 2008. 정규화식생지수를 이용한 금강유역의 순일차생산량 추정방법의 제안, *한국지반환경공학회지*, 9(6): 43-51.
- 윤정숙, 강성진, 이규성, 2009. 시계열 MODIS를 이용한 토지피복의 반사율 패턴: 2004년~2008년, *대한원격탐사학회지*, 25(2): 113-126.
- 정영상, 방정호, 임양생, 1999. 우리 나라의 순1차생산력 및 벼 수량의 지역성과 변이성, *한국농림기상학회*, 1(1): 1-12.
- 조덕기, 강용혁, 2010. 국내 태양광시스템 설치를 위한 수평면 전일사량과 운량 정밀조사, *한국태양에너지학회*, 30(3): 1-9.
- 환경부, 2010. 국가 장기 생태연구, 국립산림과학원.
- 황태희, 이도현, 2003. 경기도 광릉숲의 이산화탄소 흡수 효과 추정: 인공위성 영상과 현장 측정 자료를 이용한 생태계 모형 분석, *기후변화 포럼 및 학술대회*, 1(15): 169-180.
- Angert, A., S. Biraud, C. Bonfils, C. C. Henning, W. Buermann, J. Pinzon, C. J. Tucker, and I. Fung, 2005. Drier summers cancel out the CO₂ uptake enhancement induced by warmer springs, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102 (31): 10823-10827.
- Atlas, R. M. and R. Luchesi, 2000. File specification for GEOS-DAS celled output. Data Assimilation Office, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, Document No. DAO-1001v4.3.
- Baldocchi, D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, C. Bernhofer, K. Davis, R. Evans, J. Fuentes, A. Goldstein, G. Katul, B. Law, X. Lee, Y. Malhi, T. Meyers, W. Munger, W. Oechel, U. K. T. Paw, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson, and S. Wofsy, 2001. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor and Energy Flux Densities, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11): 2415-2434.
- Goetz, S. J., S. D. Prince, S. N. Goward, M. M. Thawley, J. Small, and A. Johnston, 1999. Mapping net primary production and related biophysical variables with remote sensing: Application to the BOREAS region, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 104(22): 27719-27733.
- Goetz, S. J., S. D. Prince, J. Small, A. Gleason, and M. M. Thawley, 2000. Interannual variability of global terrestrial primary production: Results of a model driven with satellite observations, *Journal of Geophysical Research*, 105: 20077-20091.
- Goward, S. N., R. H. Waring, and D. G. Dye, 1994. Ecological remote sensing at OTTER: Macroscale satellite observations, *Ecological Society of America*, 4(2): 322-343.
- 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.
- Heinsch, F. A., M. Zhao, S. Running, J. Kimball, R. Nemani, K. Davis, P. Bolstad, B. Cook, A. Desai, D. Ricciuto, B. Law, W. Oechel, H. Kwon, H. Luo, S. Wofsy, A. L. Dunn, J. Munger, D. Baldocchi, L. Xu, D. Hollinger, A. Richardson, P. Stoy, M. Siqueira, R. Monson, S. Burns, and L. Flanagan, 2006. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1908-1925.
- Hunt, E. R. and Jr. Raymond, 1994. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI, *International Journal of Remote Sensing*, 15(8): 1725-1729.
- Monteith, J. L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems, *Journal of Applied Ecology*, 9(3): 747-766.
- Prince, S. D., S. J. Goetz, K. Czajkowski, R. Dubayah, and S. N. Goward, 1998. Inference of surface and air temperature, atmospheric precipitable water and vapor pressure deficit using AVHRR satellite observations: Validation of algorithms, *Journal of Hydrology*, 212-213: 230-250.
- Running, S. W. and E. R. Hunt, 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, Biome-BGC, and an application for global-scale models. In: *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*, J. Ehleringer, and C. Field, pp. 141-158, Academic Press, San Diego, 236.
- Prince, S. D. and S. N. Goward, 1995. Global Primary Production: a remote sensing approach, Goward Laboratory for global remote sensing studies, *Journal of Biogeography*, 22: 815-835.
- Thornton, P. E., B. E. Law, H. L. Gholz, K. L. Clark, E. Falge, D. S. Ellsworth, A. H. Goldstein, R. K. Monson, D. Hollinger, M. Falk, J. Chen, and J. P. Sparks, 2002. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests, *Agricultural and Forest Meteorology*, 113:185-222.
- 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: 383-395.
- 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(2): 217-234.
- Zhang, Y., J. M. Xu, H. Chen, and J. Adams, 2009. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: effects of ecosystem type, geographical location and climate, *Global Ecology and Biogeography*, 18(3): 280-290.
- Zhao, M., F. A. Heinsch, R. R. Nemani, and S. V. Running, 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set, *Remote sensing of Environment*, 95(2): 164-176.
- Zhao, M., S. W. Running, and R. R. Nemani, 2006. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalysis, *Journal of Geophysical Research*, 111, G01002, doi:10.1029/2004JG000004.