

위성기반의 한반도 식물계절학적 패턴과 대기 에어로졸의 시계열 특성 분석

박선엽*

Satellite-Measured Vegetation Phenology and Atmospheric Aerosol Time Series in the Korean Peninsula

Sunyu Park*

요약 : 본 연구의 목적은 기후요소와 대기 에어로졸이 한반도 식물계절학적 특성에 미치는 영향을 위성자료 분석을 통해 규명하는 것이다. 매일 관측되는 위성관측 자료의 분석을 통해 지표관측이 갖는 식물계절학적 연구상의 시계열적 한계를 극복하고자 하였다. 연구결과에 따르면, 분석된 4개의 주요 산림생태계 중 상록수림, 낙엽수림, 초지는 서로 유사한 식물계절학적 특성을 보인 반면, 혼합림의 성장 패턴의 연도별변화는 상이하게 나타났다. 식생지수(VI)의 연중 진폭이 큰 삼림은 VI 연중 최대치에 보다 빨리 도달하는 것으로 조사되었지만, 동일 산림생태계 내에서는 시계열적인 관련성이 나타나지 않았다. 식생지수의 위상(phase)은 VI 최대치가 관측되는 연중 시점을 의미하는데, 기온의 변화와 강한 상관성을 보였다. 에어로졸 광학두께(AOT)의 시계열변화는 연도별 변화뿐만 아니라 계절적 특징을 강하게 나타내었다. 일반적으로, 에어로졸 농도는 늦봄부터 초여름에 걸쳐 가장 높게 나타났다. 하지만 AOT의 연도별변화 패턴은 진폭과 위상 변화 측면에서 식생지수와 통계적으로 강한 상관관계를 보이지 않았다. 단지, AOT의 연중 진폭(amplitude)이 식생지수의 진폭과 미약한 상관관계를 보인 결과로 볼 때, 전반적인 에어로졸의 농도 변화가 식생활동에 영향을 미칠 가능성이 있다고 판단된다.

주요어 : MODIS, 식생지수, 식물계절학, 에어로졸 광학두께

Abstract : The objective of this study is to determine the spatiotemporal influences of climatic factors and atmospheric aerosol on phenological cycles of the Korea Peninsular on a regional scale. High temporal-resolution satellite data can overcome limitations of ground-based phenological studies with reasonable spatial resolution. Study results showed that phenological characteristics were similar among evergreen forest, deciduous forest, and grassland, while the inter-annual vegetation index amplitude of mixed forest was differentiated from the other forest types. Forest types with high VI amplitude reached their maximum VI values earlier, but this relationship was not observed within the same forest type. The phase of VI, or the peak time of greenness, was significantly influenced by air temperature. Aerosol optical thickness (AOT) time-series showed strong seasonal and inter-annual variations. Generally, aerosol concentrations were peaked during late spring and early summer. However, inter-annual AOT variations did not have significant relationships with those of VIs. Weak relationships between AOT amplitude and EVI amplitude only indicates that there would be potential impacts of aerosols on vegetation growth in the long run.

Key Words : aerosol, vegetation index, phenology, AOT

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 NRF-2010-0024819).

* 부산대학교 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Pusan National University), spark@pnu.ac.kr

1. 서론

기후변화에 대한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 연구보고서에 따르면, 동북아시아 지역에 미치는 기후변화의 영향이 세계 어느 지역보다도 강하게 나타나고 있다. 구체적으로, 이 지역의 온난화 속도는 세계 평균을 넘고 있고, 21세기 말까지 최대 4.3°C까지 기온이 증가할 것으로 내다보고 있다(Christensen *et al.*, 2007). 우리나라의 경우에도 기후의 아열대화가 진행되고 있는 것으로 보고되고 있고, 기후변화에 민감한 식생분포도 머지않아 아열대화 할 것으로 예측된다. 통계적으로 볼 때 식물의 개엽시기가 앞당겨지는 추세가 나타나고 있고, 겨울과 여름간의 기온차가 빠른 속도로 작아지고 있으며, 한반도 몬순(monsoon)의 패턴도 현저히 달라지고 있는 점 등 기후와 생태계간의 상호작용이 지역적으로 표출되고 있다. 이러한 온난화 추세에도 불구하고, 동북아시아 지역에서는 세부적인 기후변화 연구는 소수의 연구자 그룹에 국한되고 있다. 식생의 활동은 대기 환경에 가장 중요한 인자로 작용하기 때문에, 위성 자료를 이용한 지역규모 이상의 광역 수준의 식물 생산성 연구가 최근 단주기 위성 센서를 중심으로 시도되고 있다(Clark *et al.*, 2008; Heumann *et al.*, 2007; Potter *et al.*, 2007; Potter *et al.*, 2008; Xiao *et al.*, 2004a; Xiao *et al.*, 2004b). 기후변화와 관련한 식생의 생산성과 탄소수지 연구는 생물량이 많은 저위도 지역이나 용빙작용이 대규모로 일어나는 고위도 지역을 대상으로 주로 이루어지고 있는 반면(Saleska *et al.*, 2003; Valentini *et al.*, 2000), 우리나라를 비롯한 한반도 일대의 중위도 기후변화 영향을 분석한 시계열 연구는 부족한 실정이다.

위성기반의 식물생산성 추정 모델은(e.g. Vegetation Photosynthesis Model) 식생지수를 이용하여 식생의 총생산성 또는 순생산성을 고정된 light-use efficiency를 전제로 산출하고 있다(Xiao *et al.*, 2004a). 국내에서는 식물계절학적 차원에서 개엽의 시기와 기온간의 상관성을 파악하기 위한 연구가 수행된 바 있으나, 지역적 차원에서 대기질과의 연관성을 살핀

연구는 수행되지 못하고 있다(Kang *et al.*, 2003). 계절적인 기후요소의 영향 외에, 구체적인 대기 에어로졸 분포에 따른 식생활동 정보가 산출된다면, 지역적 탄소수지 모델링에 중요한 인자로 활용될 수 있을 것이다.

황사나 대기 오염물질 등은 일조량과 복사에너지 수지에 직접적인 영향을 미치기 때문에 지표의 식생 성장에 간접 요인으로 작용할 것으로 예측된다. 즉, 에어로졸의 농도증가로 인한 지표 도달 태양광의 감소는 식물성장의 억제요인으로 작용하며, 에어로졸의 유무에 따른 지표온도 변화 역시 식물생장과 직접적인 관련을 맺고 있다. 특별히, 강수 패턴이 급변하는 지역의 경우에는 에어로졸의 존재로 인해 식물성장의 크게 영향 받을 것으로 예상된다. 중국을 중심으로 한 동아시아 지역은 높은 에어로졸의 농도와 빈도에도 불구하고 그 역할과 영향에 대한 연구 성과가 극히 미미한 실정이다. 위성자료를 이용한 에어로졸 분포 파악은 식생활동을 나타내는 식생지수 주기성변화에 대한 대기 에어로졸의 광역적 영향을 정량적으로 관측하게 해 주기 때문에, 빈번하게 나타나는 대기질 변화의 중요성을 설득력 있게 제시해 줄 수 있다(Lee *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2009; Wong *et al.*, 2009; Wong *et al.*, 2010).

대기 에어로졸은 지구복사에너지 수지, 물순환, 기후변화 요소에 밀접히 연관되어 있어서 대기과학 연구자들을 중심으로 점차 연구 활동이 활발해지고 있는 분야이다. 특히, 에어로졸 분포와 특성을 광범위한 지역에 대해 정량적으로 파악하기 위해 인공위성 자료의 사용이 일반화되고 있다(Kaufman *et al.*, 2002). 식생지수를 통한 식물계절성 연구에서는, 태양광을 흡수하거나 산란시키는 대기 중 에어로졸의 영향에 따라 관측되는 식물활동의 신호를 변화시키기 때문에 이에 대한 시공간적 분석이 필요하다. 대기 중 에어로졸이 갖고 있는 복사강제력의 효과는 적지 않은 것으로 조사되고 있으며, 우리나라의 경우 대규모 산불, 황사와 같은 분진 확산으로 인해 복사에너지 입사와 반사 조건에 고려해야 할 인자로 판단된다. 대기 물질의 복사강제력 요인은 그 동안 기후변화에 영향을 주는 요인 중 불확실성이 가장 높은 항목으로 알

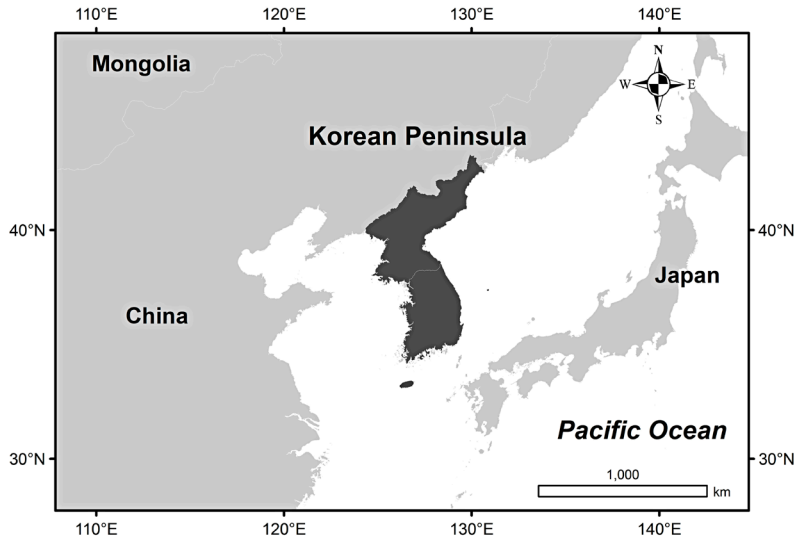


그림 1. 연구 지역

려져 있어서, 기후변화 지시자로서의 식물계절학적 신호에 영향을 미치는 에어로졸의 역할을 탐구하는 것은 학문적 의미가 크다. 특히, 중국의 산불 발생, 산업화로 인한 대기물질, 내륙으로부터의 황사 유입이 빠른 속도로 증가하고 있기 때문에, 한반도에 미치는 계절적 영향 및 장기 변화 연구가 중요하다. 본 연구의 목적은 기온과 대기 에어로졸이 한반도 식물계절학적 주기성에 미치는 시공간적 영향을 지역적 규모에서 짧은 획득 주기를 갖는 위성자료(hyper-temporal satellite data)를 기반으로 파악하는 것이다.

2. 연구자료 및 방법

1) 연구지역

연구의 지리적 범위는 한반도 전체로 하였으며(그림 1), 시계열적으로 MODIS 자료가 연중 획득되기 시작한 2001년부터 2010년까지 10년으로 한정하였다. 한반도는 남북방향으로 약 10도 범위(33°N-43°N)에 걸쳐 있으며, 기후적으로 계절적 특성을 나타낸다. 연평균 기온은 2.1°C에서 15.9°C 범위에 있지만,

위도, 고도, 대륙도에 따라 많은 편차를 보인다. 하계 절은 전선시스템과 태풍의 영향으로 강수가 집중되는데, 6월에서 9월에 걸쳐 내리는 강수량이 연강수량의 약 60%를 차지한다. 겨울철에는 시베리아 고기압의 영향권에 놓여 한랭건조한 북서풍이 지배적으로 나타난다. 대부분의 지역에서 1월 강수량은 연강수량의 10%에 못 미치며 1월 평균기온도 영하에 머무른다(Nieuwolt, 1977).

2) 자료 획득 및 처리

MODIS는 모두 36개의 서로 다른 채널을 갖는 hyper-spectral 위성 시스템인데, 채널에 따라 250m, 500m, 또는 1km에 해당하는 공간해상도를 가진 다목적 지구관측 센서이다(Justice *et al.*, 1998). MODIS 자료군 중 16일 주기로 합성된 식생지수 자료인 MOD13Q1과 MYD13Q1을 미지질조사국 Land Process Distributed Active Archive Center(LP DAAC)로부터 다운로드 하였다. 이 자료는 각각 MODIS 센서 Terra와 Aqua에 의해 관측된 자료 레이어를 포함하고 있는데, 250m×250m 공간해상도를 갖는 식생지수자료인 Normalized Difference Vegetation Index(NDVI)와 Enhanced Vegetation Index(EVI)의

16일 합성값을 비롯하여 위성관측 시의 기하학적 조건, 각 화소의 질, 16일 주기 합성에 사용된 관측일 등 12개의 독립된 레이어가 주요 항목이다. NDVI는 엽면적 지수, 유효광합성 복사량비 등 식물활동과 강한 상관성을 갖는 정규식생지수로 적색 파장대와 근적외선 파장대의 반사비율을 통해 계산된다:

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + \rho_{red})$$

ρ_{nir} 와 ρ_{red} 는 각각 근적외선과 적색 파장대의 반사율이다. EVI는 피복 밀도가 높은 삼림에 보다 민감하게 반응하도록 개발된 MODIS 기반의 식생지수로 기존의 근적외선과 적색파장대 외에 추가적으로 청색 파장(ρ_{blue})을 사용하여 대기의 영향을 최소화한 알고리즘이 적용되었다(Huete *et al.*, 2002):

$$EVI = 2.5 \times (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + (6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue}) + 1)$$

연구 지역인 한반도 전체를 포함하기 위해서 모두 3개의 자료획득 단위(또는 tile)를(h27v04, h27v06, h28v05) 수집하여 하나의 파일로 mosaic 처리하였다. 따라서 연중 23개 자료 합성 주기별로 3개 타일 자료가 사용되었으므로 연구 기간(2001-2010) 동안 식생지수 별로 690개의 tile이 각각 사용되었다. 구름의 영향을 배제하기 위해 구름 화소 정보 레이어를 사용하여 구름 또는 구름 그림자 화소를 분석에서 제외하였다.

대기 에어로졸 광학두께 분석을 위한 자료로는 MOD08 에어로졸 자료가 사용되었다. 이 자료는 식생지수 자료와 같이 Terra 위성에 탑재된 MODIS 센서에 의해 2000년부터 생산되어 오고 있다. 지금까지 위성기반의 에어로졸 관측은 반사도가 높은 지표나 대기 신호의 영향을 제거하여 에어로졸 신호만을 구분해 내는데 기술적 한계가 있었으나, 분광해상도가 크게 향상된 MODIS의 운용으로 육상 에어로졸의 관측이 가능해졌다. 이 자료는 대기 에어로졸과 구름에 대한 정보를 담고 있는데, 본 연구에서는 에어로졸 광학두께(aerosol optical thickness or AOT)가 사용되었다. 육지의 경우, 해양에 비해 반사도가 높기 때문에

반사도가 비교적 낮은 지점('dark pixels')을 찾아 근적외선 파장대(2.13 μ m)와 가시광선 파장대(0.47 μ m, 0.66 μ m)의 반사도 간의 비율을 통해 지표반사도를 산정하고 이를 화소값에서 제거함으로써 대기 중 에어로졸의 광학두께값을 추정하게 된다. 에어로졸 광학두께는 대기 중의 에어로졸 입자가 갖는 광 소산계수(light extinction)의 총합으로 표현되는데, 구체적으로는 대기 칼럼의 고도별 광 소산계수를 적분한 값으로 정의된다(이권호, 2012):

$$\tau = \int_0^{\infty} \sigma(z) dz$$

수식에서 광 소산계수(σ)는 입사에너지 중에서 산란되거나 흡수되는 양을 비율로 표현한 값이다. MOD08 자료는 해양 및 육지의 에어로졸 광학두께 정보를 모두 포함하고 있으며, 지표반사도와 AOT 간의 관계가 미리 설정된 Look-Up Table(LUT)에 기반하여 에어로졸 광학두께가 결정된다(Kaufman *et al.*, 1997; Levy *et al.*, 2007). 토지피복 자료로는 유럽항공우주국에서 제공하는 지표피복분류 자료인 GlobCover2009를 사용하였다(Sophie *et al.*, 2010). 전체 22개 class로 분류된 원 자료를 일반화하여 본 연구에서는 4개의 주요 식생피복(mixed forest(MF), deciduous forest(DF), evergreen forest(EF), grassland(GR))으로 묶어 단순화 하였다. 각 분석 대상 자료의 이미지 분석 및 통계 작업을 위해 Erdas Imagine 9.1 version이 사용되었다. 본 연구에 사용된 기상자료는 90개 남북한 관측소 자료이며, 기상청 일별자료와 미국해양대기국 National Climatic Data Center (NCDC)에서 제공하는 Global Summary of the Day (GSOD)자료가 포함되었다.

3) 시계열 분석(Time-series analysis)

식생지수와 같이 주기적으로 관측되는 시계열 자료를 한정된 수의 주요 파형 곡선으로 요약하여, 파장(wavelength), 진폭(amplitude), 위상(phase)으로 단순화하는 기법을 하모닉분석법이라 한다(Jakubauskas *et al.*, 2001). 생성된 모든 파형을 합산하면 원래의 입

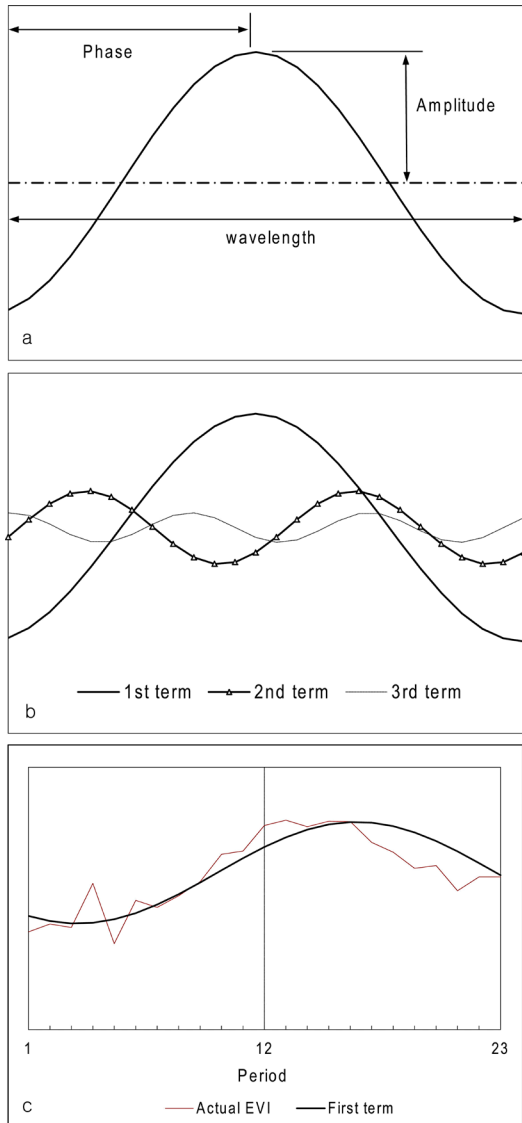


그림 2. 하모닉 분석법의 개요

*주: 하모닉 분석법은 한 변수의 시계열변화를 몇 개의 주요 주기곡선으로 단순화하여 원 자료 내에 존재하는 지배적인 주기성을 파악할 수 있게 해 준다(a). 연중 한 차례의 peak가 나타나는 주기 파형을 first term이라 부르고, peak의 수가 증가함에 따라 second term, third term 등으로 표현한다(b). 광합성 활동의 주기성을 나타내는 자료의 변량은 중위도 지역의 경우 1st term으로 대부분 설명된다(c).

력 자료로 복원되는데, 파장은 식물 생장이 한 사이클을 마치는 데에 필요한 시간, 진폭은 식생지수 연

간 변화량, 그리고 위상은 최고 식생지수가 나타나는 시기를 나타낸다(그림 2). 따라서 연중 지배적으로 나타나는 주기성을 하모닉분석을 통해 단순화하여 광합성 활동의 정점을 이루는 시점, 식물성장 기간, 그리고 생산성을 파악함으로써 삼림생태계의 생물계절학적 패턴을 기후 요소에 대비해 살펴볼 수 있다(Schuur, 2003; Huete *et al.*, 2006; Park, 2009; Park, 2010). MODIS에서 제공되는 식생지수 중 EVI는 NDVI에 비해 연중 일관되고 명확한 신호를 보였으므로 EVI자료에 국한하여 하모닉 분석을 실시하였고, 구름의 영향으로 인한 식생지수 합성자료의 손실 분은 보간법을 실시하여 해당 합성주기의 직전 및 직후 기간의 자료를 평균하여 자료의 연속성을 보완하였다. MODIS Terra 자료의 경우, 연구기간 중 합성주기별 자료보완률은 최소 2.6%에서 최대 14.5% 범위로 계산되었다. 일반적으로, EVI는 식생지수에 미치는 대기의 간섭효과를 최소화하여, 광합성이 왕성하게 일어나는 삼림환경에도 민감하게 반응하는 것으로 평가된다(Huete *et al.*, 2002). 기상자료 역시 주기분석을 실시하였다. 기상청과 미국해양대기국으로부터 수합한 남북한 지역을 포함한 한반도 전역의 일별 측후소자료 중 연구기간 중 누락치가 없는 90개 측후소에 대해 평균, 최고, 최저 기온의 월평균값을 주기분석에 적용하였다.

4) 에어로졸의 영향 분석

에어로졸은 기후모델 분야에서 중요 요소인 복사강제(radiative forcing) 효과를 산출하는데 중요한 자료일 뿐만 아니라 대기 중 복사에너지의 소산 및 산란 과정에 영향을 미쳐 식생지수와 같은 지표반사 자료에 직간접적으로 영향을 미친다(이권호, 2011). 특히 광범위한 지역에서의 에어로졸 광학두께 산출의 중요성으로 인하여 지난 1970년대부터 위성자료 기반의 AOT 산출기법이 개발되어 왔다(이권호 등, 2002; Lee *et al.*, 2009). 본 연구에 사용된 MODIS AOT 자료는 해상도 10km로 제공되고 있으며, AOT 정확도는 육지의 경우 $\pm 0.05 \pm 0.20$ AOT로 알려져 있다(Remer *et al.*, 2002). 최근 버전이 개선되면서 공개

된 자료는 알고리즘이 향상되면서 정확도가 향상되었다(Remer *et al.*, 2005; Levy *et al.*, 2007). 에어로졸 분석 알고리즘은 AOT를 구하기 위한 것으로, 전세계에 광범위하게 분포된 Aerosol Robotic Network (AERONET; Holben *et al.*, 1998) 자료를 토대로 정확도 검증이 실시된다.

3. 연구결과 및 논의

1) 식생피복별 성장주기성과 기온

식생피복의 종류를 혼합림, 낙엽수림, 상록수림, 초지 등 4개로 단순화하여 진행한 본 연구에서는 모든 식생 종류에 대해 1차 파형의 설명력이 지배적으

로 나타났다. 자료의 연중 변동을 설명하는 1차 파형의 분산비중은 86.9~94.1%로 전형적인 중위도 지역의 식생계절학적 패턴이 나타났다(그림 3). 연중 식생지수의 변동 폭을 나타내는 진폭(amplitude)은 낙엽수림이 가장 크게 나타났고, 혼합림이 가장 낮았다. 낙엽수림, 상록수림, 초지는 서로 유사한 연도별변화 패턴을 보인 반면, 혼합림의 경우 다른 식생피복과 구별되는 양상을 보여주었다. 수종 구성이 다른 그룹에 비해 복잡한 혼합림의 경우, 진폭의 연도별 변화가 일관된 특성을 보이기 힘들었다고 판단된다.

식생지수의 연중 진폭은 식생지수의 연평균값이 높아짐에 따라 증가하였다. 연간 식생지수의 변동 폭이 클수록 식생지수의 최고치가 계절적으로 일찍 나타나는 경향을 보였지만, 식생피복별로 이러한 관련성은 시계열적으로 나타나지 않았다(그림 4-a와 b). 분석한 자료 중 식생 성장의 계절성에 중요한 영향

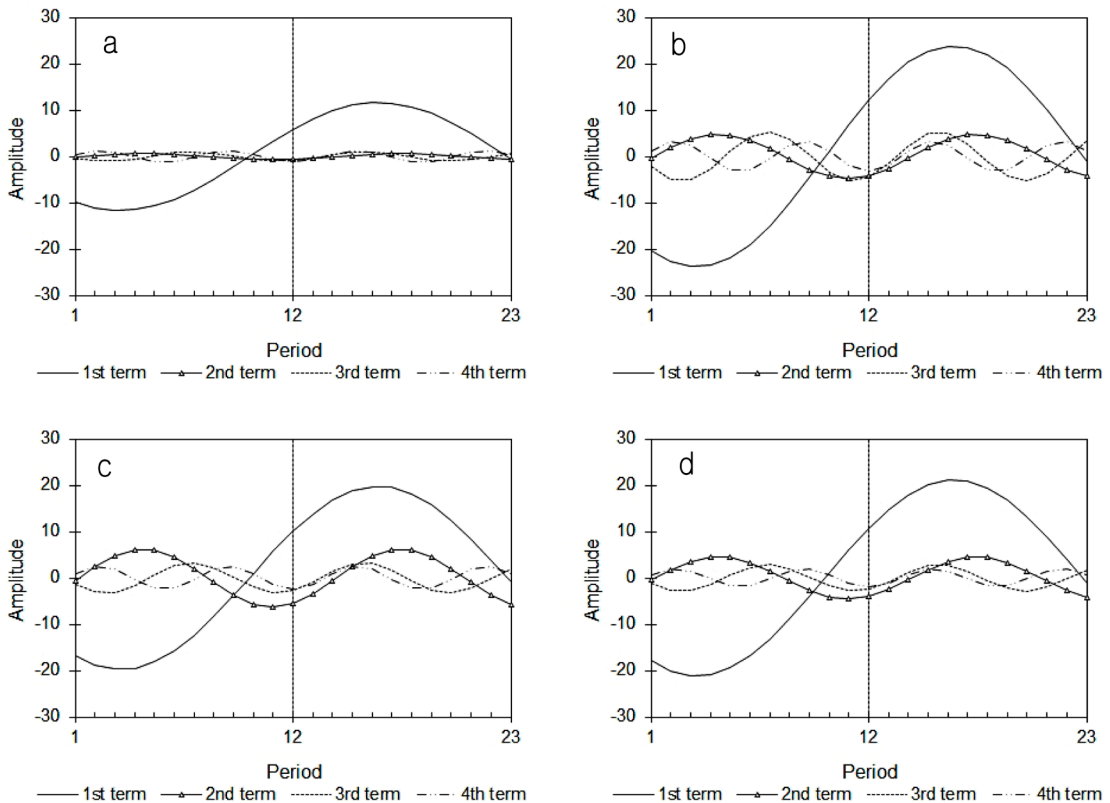


그림 3. 주요 식생피복별 하모닉 패턴(a-mixed forest, b-deciduous forest, c-evergreen forest, d-grassland)

*자료: 2010년 기준

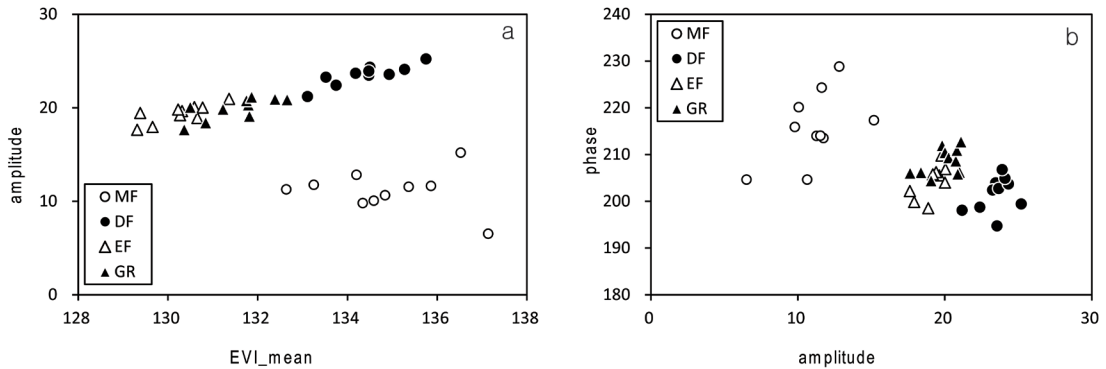


그림 4. 식생지수의 평균값-진폭 간(a), 진폭-위상 간(b) 상관관계

을 준 요인은 기온으로 나타났다. 하모닉분석을 통해 계산된 평균기온 위상은 식생지수의 위상과 강한 양의 상관관계를 보여주었다(그림 5; $r=0.61\sim0.79$). 즉, 기온 상승 속도가 늦어질수록 식생지수의 최고치 도달 시점도 지연되는 결과를 보였다. 특히, 활엽수림과 상록수림은 다른 식생피복에 비해 최고기온($r=0.651, 0.689$), 최저기온($r=0.737, 0.756$), 평균기온($r=0.779, 0.790$) 모두에 대해 강한 상관관계를 나타내었다. 우리나라의 경우 생장 온도범위는 수종에 따라 최난월 또는 최한월 기온이 제한요인으로 작용한다고 알려져 있는데, 난대성의 경우 저온조건이, 한대성의 경우 고온조건이 식물 성장을 제한할 수 있다(구경아 등, 2001). 본 연구에서는 북한 지역을 포함한 한반도 전역이 연구대상 지역인 점을 감안할 때, 일반적인 한반도 상록활엽수, 특히 산악지역에 분포한 삼림의 기온 의존성이 지배적으로 나타난 것으로 판단된다. 본 연구에 사용된 자료의 분류로 살펴볼 때, 혼합림(9만 3천 ha)이나 초본(119만 ha)에 비해 낙엽수(877만 ha) 및 상록수림(543만 ha)의 면적이 대부분을 차지함으로써 이들 삼림 그룹에 대한 기온의 영향이 보다 강하게 나타났을 것으로 추론된다. 최근 수행된 중위도 낙엽활엽수림을 대상으로 한 연구에서도 태양복사량과 함께 기온이 식물생산성에 가장 큰 영향을 미친 것으로 보고된 점으로 미루어, 한반도 삼림환경에서도 생장 사이클에 미치는 기온의 영향이 강하게 나타날 것으로 판단된다(Potitthep and Yasuoka, 2011). 면적에 비해 산악의 비중이 높은 한

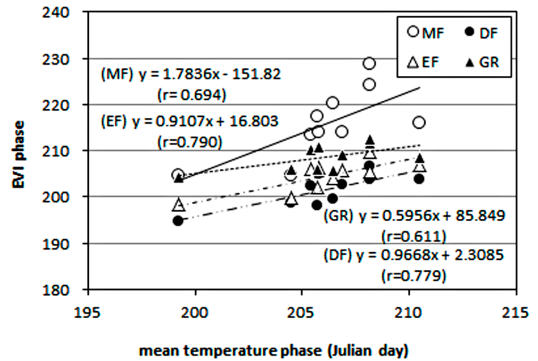


그림 5. 평균기온과 식생지수 위상 간 상관관계

반도의 특성상, 고도와 향(aspect)의 국지적 영향이 상대적으로 큰 만큼, 군집 또는 군단 수준에서의 기온 민감도는 공간적 분화를 통해 심화된 분석을 통해 규명될 것으로 사료된다.

전반적인 식생성장 속도의 변화는 기후적으로 지역적인 온난화 과정에 영향을 줄 것으로 예상된다. 중국과 한반도를 포함한 동아시아 지역의 온난화 경향을 식생지수 변화 패턴과 관련지은 최근의 연구들은 식생활동에 따른 증발산 증가가 봄철 기온 증가 폭의 저하를 가져왔다는 결과를 제시하고 있다(Jeong *et al.*, 2009a; Jeong *et al.*, 2009b). 즉, 식생지수의 증가로 광합성활동이 강화되는 지역의 경우 그렇지 못한 지역에 비해서 냉각효과가 크게 나타나 결과적으로 봄철 기온 상승의 폭이 작아지는 현상이 나타나고 있다. 본 연구에서도 기온의 위상과 식생지수 위상 간에 강한 양의 상관관계를 보여 기온변화와 식생활동 사

이의 상호작용을 뒷받침 하고 있다.

2) 에어로졸 분포와 영향

그림 6은 2001-2010년 기간 동안의 MODIS 에어로졸 광학두께의 매년 통계치를 식생지수와 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 시계열 상으로 볼 때, 연도별 변화와 함께 강한 계절적 변동을 보여주었다. 주로 늦봄부터 초여름 기간 동안 에어로졸의 농도가 높게 나타났다. 전체적인 AOT 연도별 변화는 식생지

수의 변화와 유의한 상관관계를 보여주지 않았다. 최근 연구 결과에 따르면, 한반도에 직접적인 영향을 주는 동북아시아 지역의 에어로졸 분포는 주로 중국 동부에서의 산업화 과정과 연관이 큰 것으로 추정되며, 이는 자연적인 산불 등의 영향 외에 인위적인 오염원에 의한 것으로 알려져 있다(Li *et al.*, 2007). 일례로, 자료상에 나타난 2003년의 예외적인 에어로졸 농도의 급증은 산불과 같은 바이오매스 연소와 관련된 것으로 보고된 바 있다(이권호, 2012). 다양한 발생원에 의해 한반도에서 관측되는 에어로졸의 분포는 보건

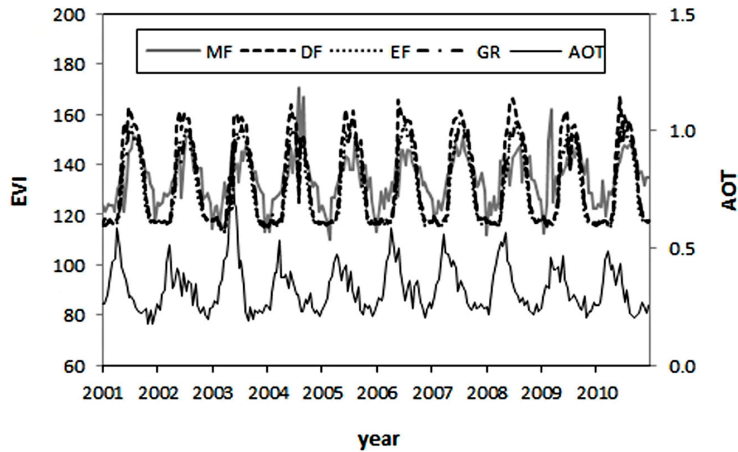


그림 6. 연구기간 동안의 AOT와 EVI의 변화 추이
 *주: 식생지수값은 0-200범위로 rescaling되었다.
 *자료: AOT 자료는 이권호(2012)로부터 재구성.

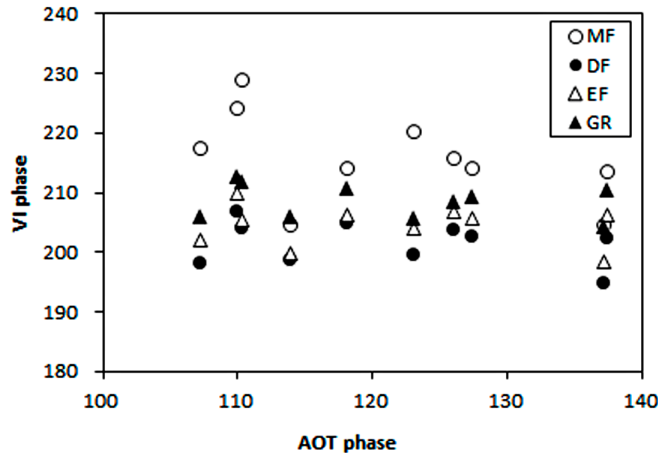


그림 7. AOT 위상(phase)과 식생지수 위상 간의 관계

문제뿐만 아니라 지표에 도달하는 복사에너지의 증감을 직접적으로 변화시키는 요인으로서 한반도 기후변화와 지표생태계에 큰 영향을 줄 것으로 추정된다(이동하 등, 2006; Chin *et al.*, 2002). 이에 대한 정량적 분석과 영향력에 대한 연구는 아직 미약한 상태이므로 공간적으로 세부적인 추가 분석이 필요하다.

에어로졸 AOT의 연중 진폭(amplitude)은 식생지수의 진폭과 미약한 상관관계(Spearman's rho)를 나타내었다(DF: $r=0.43$, EF: $r=0.67^*$, GR: $r=0.51$; * $p < 0.05$). 분석 결과를 볼 때, 통계적으로 강한 상관관계를 나타내 보이지 않은 것은 지리적으로 세부적인 분석이 이루어지지 못한 측면이 있지만, 전반적인 에어로졸의 농도 변화가 식생활동에 영향을 미칠 개연성이 있다고 판단된다. 대조적으로, AOT의 최고치가 나타나는 시기를 나타내는 위상값은 식생지수의 위상값과 약한 정도에 그치고 있기는 하지만 전반적으로 음의 상관관계를 나타내었다($r=-0.24 \sim -0.60$). 즉, 에어로졸의 농도 최고치가 봄에 일찍 도달할수록, 식생지수 연중 최대치의 도달 시점이 지연되는 경향을 보여주었다(그림 7).

4. 요약 및 결론

다양한 삼림생태계의 존재로 인해 중요한 탄소 저장고 역할을 하는 동북아시아 지역에서 기후변화에 대한 식물생장의 반응이 강하게 나타나고 있다. 한반도 지역은 중국 북동부와 함께 삼림의 수종 변화가 빠르게 일어나고 있는 것으로 보고되고 있다. 대기 에어로졸은 대기와 입사하는 태양에너지 간의 상호작용에서 매우 중요한 역할을 하기 때문에 기후모델에 적용되는 핵심 변수 중 하나이다. MODIS가 제공하는 식생지수와 에어로졸 자료는 식물계절학과 대기 질의 특성을 지역적 규모에서 연구하기에 적합한 공간해상도와 시간해상도를 가지고 있다. 본 연구는 매일 관측되는 MODIS 자료의 분석을 통해 지표관측이 갖는 식물계절학적 연구 상의 시계열적 한계를 극복하고 기후요소와 대기 에어로졸이 한반도 식물계절

학적 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 한반도 전체 식생 타입을 4개로 단순화하여 분석한 결과에 따르면, 상록수림, 낙엽수림, 초지는 서로 유사한 식물생장 패턴을 보인 반면, 혼합림은 이와 구별되었다. 연중 식물생장의 폭을 나타내는 진폭(amplitude)은 낙엽수림, 상록수림, 초지 사이에서 서로 유사한 연도별변화를 보였으나, 수종 구성이 다른 그룹에 비해 복잡한 혼합림의 경우, 진폭의 연도별변화가 일관된 특성을 보이지 않았고 성장폭도 현저히 낮았다. 식생지수의 연중 변화폭은 식생지수의 연평균값이 높아짐에 따라 증가하였다. 연간 식생지수의 변동폭이 클수록 식생지수의 최고치가 계절적으로 일찍 나타나는 경향을 보였지만, 식생피복별로 이러한 관련성은 시계열적으로 나타나지 않았다. 최고기온이 계절적으로 빨리 도달할수록 식생지수의 최고치도 이르게 나타났다. 특히, 낙엽활엽수림과 상록수림은 다른 식생피복에 비해 최고기온, 최저기온, 평균기온 모두에 대해 강한 상관관계를 나타내었다. 고도와 사면에 따른 국지적 환경변화가 큰 한반도 환경을 고려할 때, 본 연구는 연구지역 전체를 4개 그룹으로 단순화하는 과정에서 수종 구성 또는 biome별 기온의 영향을 세부적으로 살필 수 없었던 한계를 노정하고 있다. 다만, 북한 지역을 포함한 한반도 전역이 연구대상 지역인 점을 감안할 때, 산악지역에 분포한 상록활엽수와 같은 대표적인 삼림의 기온 의존성이 지배적으로 나타난 결과로 추론해 볼 수 있다. 보다 구체적인 환경인자와 식물생장 간의 인과관계를 탐구하기 위해서는 한반도 전체 규모에서 지역 차원 또는 로컬 차원의 분석단위로 전환되어야 할 것이며, 연구지역 전체에 대한 식생분류 상의 오류도 극복해야 할 과제로 남아 있다.

에어로졸 광학두께의 시계열변화는 연도별변화뿐만 아니라 계절적 특징을 강하게 나타내었다. 일반적으로, 에어로졸 농도는 늦봄부터 초여름에 걸쳐 가장 높게 나타났다. 하지만, AOT의 연도별변화 패턴은 식물생장 폭과 유의한 상관성을 보이지 않았다. 또, 시계열적 측면에서도 에어로졸의 농도 최고치가 봄에 일찍 도달할수록 식생지수의 최대치 도달 시기는 지연되는 경향을 보였지만, 통계적으로 일관된 유

의성이 확인되지 못했다. 따라서, 에어로졸의 농도변화가 식생생장에 있어 광제한적(light-limited) 요인으로 작용하는 지를 확인하기 위해서는 연구 지역을 단순화한 전체적인 분석 외에 공간적으로 세부화된 추가적 연구가 필요하다고 판단된다. 최근의 광범위 토지이용변화와 식물계절성의 변화는 지역별로 탄소수지의 지리적 패턴을 변화시키고 있다고 보고된다(Schimel *et al.*, 2001). 본 연구는 이러한 지역적 변화를 추정하기 위한 위성자료 기반의 식물생산성 추정 모델을 정교화 하는 데에 도움을 줄 것으로 전망된다(Potter *et al.*, 2008; Xiao *et al.*, 2004a; Xiao *et al.*, 2004b). 향후 이어질 연구에서는 에어로졸의 수직구조를 표현하는 능동형 센서자료의 활용이 포함될 필요가 있다. 수동형 위성관측에 비해 Lidar와 같은 능동형 센서는 대기로부터 반사되는 광에너지를 통해 구름과 에어로졸의 3차원적인 정보를 제공한다. 이는, MODIS 관측 자료가 갖는 평면적인 대기질 분석의 한계를 극복한다는 연구방법론 상의 차별성을 제공한다. 응용 측면에서는 3차원적 대기질의 영향을 분석함으로써 인해 농업분야 작물생산성 예측분야와 반복적으로 나타나는 대규모 황사, 분진 등 대기환경에 따른 식생 피해 분석에 적용 가능할 것이다.

참고문헌

- 구경아·공우석·김종규, 2001, "한반도 상록활엽수의 지리적 분포와 기후요소," *대한지리학회지*, 36, 247-257.
- 이권호·김정은·김영준·서애숙, 2002, "GMS-5 인공위성 원격탐사 자료를 이용한 대기 에어로솔 모니터링," *한국지리정보학회지*, 5, 1-15.
- 이권호, 2011, "지구관측 위성자료를 이용한 주요 대기 에어로솔 성분의 공간분포 분석," *한국지리정보학회지*, 14, 109-127.
- 이권호, 2012, "동북아시아 지역의 바이오매스 연소 활동이 지역 대기 환경에 미치는 영향," *한국지리정보학회지*, 15, 184-196.
- 이동하·이권호·김정은·김영준, 2006, "동북아시아 지역에서 Terra/MODIS 위성자료를 이용한 2000-2005년 동안의 대기 에어로솔 광학두께 변화 특성," *Atmosphere*, 16, 85-96.
- Chin, M., Ginoux, P., Kinne, S., Holben, B. N., Duncan, B. N., Martin, R. V., Logan, J. A., Higurashi, A., and Nakajima, T., 2002, Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sunphotometer measurements, *Journal of Atmospheric Sciences*, 59, 461-483.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., and Whetton, P., 2007, Regional Climate Projections, in S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and Miller, H. L. (eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge and New York, 847-940.
- Clark, D. B., Olivas, P. C., Oberbauer, S. F., Clark, D. A., and Ryan, M. G., 2008, First direct landscape-scale measurement of tropical rain forest Leaf Area Index, a key driver of global primary productivity, *Ecology Letters*, 11, 163-172.
- Heumann, B. W., Seaquist, J. W., Eklundh, L., and Jons-son, P., 2007, AVHRR derived phenological change in the Sahel, Sudan, Africa, 1982-2005, *Remote Sensing of Environment*, 108, 385-392.
- Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., and Smirnov, A., 1998, AERONET-a federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, 66, 1-16.
- Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. and Ferreira, L. G., 2002, Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213.
- Huete, A. R., Didan, K., Shimabukuro, Y. E., Ratana,

- P., Saleska, S. R., Hutyrá, L. R., Yang, W., Nemani, R.R., and Myneni, R., 2006, Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season, *Geophysical Research Letters*, 33, L06405, DOI:10.1029/2005GL025583.
- Jakubauskas, M. E., Legates, D. R., and Kastens, J. H., 2001, Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, 461-470.
- Jeong, S.-J., Ho, C.-H., and Jeong, J.-H., 2009a, Increase in vegetation greenness and decrease in springtime warming over East Asia, *Geophysical Research Letters*, 36, L02710, doi:10.1029/2008GL036283.
- Jeong, S.-J., Ho, C.-H., Kim, K.-Y., and Jeong, J.-H., 2009b, Reduction of spring warming over East Asia associated with vegetation feedback, *Geophysical Research Letters*, 36, L18705, doi:10.1029/2009GL039114.
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., Privette, J. L., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Running, S. W., Nemani, R. R., Wan, Z., Huete, A. R., van Leeuwen, W., Wolfe, R. E., Giglio, L., Muller, J. P., Lewis, P., and Barnsley, M. J., 1998, The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1228-1249.
- Kang, S., Running, S. W., Lim, J., Zhao, M., Park, C., and Loehman, R., 2003, A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: an application of MODIS leaf area index, *Remote Sensing of Environment*, 86, 232-242.
- Kaufman, Y. J., Tanré, D., Remer, L., Vermote, E. F., Chu, A., and Holben, B. N., 1997, Operational remote sensing of troposphere aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectrometer, *Journal of Geophysical Research*, 102, 17051-17067.
- Kaufman, Y. J., Tanré, D., and Boucher, O., 2002, A satellite view of aerosols in the climate system, *Nature* 419, 215-223.
- Lee, K. H., Kim, Y. J., and Kim, M. J., 2006, Characteristics of aerosol observed during two severe haze events over Korea in June and October 2004, *Atmospheric Environment*, 40, 5146-5155. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.03.050.
- Lee, K., Li, Z., Kim, Y., and Kokhanovsky, A., 2009, Atmospheric aerosol monitoring from satellite observations: a history of three decades, in: Y. Kim, U. Platt, and Iwahashi, M. B. (eds.), *Atmospheric and Biological Environmental Monitoring*, Springer, New York, 13-38.
- Levy, R. C., Remer, L. A., Matto, S., Vermote, E. F., and Kaufman, Y. J., 2007, A second generation algorithm for retrieving aerosol properties over land from MODIS spectral reflectance, *Journal of Geophysical Research*, 112:D13211.
- Li, Z., Niu, F., Lee, K. H., Xin, J., Hao, W. M., Nordgren, B., Wang, Y., and Wang, P., 2007, Validation and understanding of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements from the handheld Sun photometer network in China, *Journal of Geophysical Research*, 11, D22S07, doi:10.1029/2007JD008479.
- Nieuwolt, S., 1977, *Tropical Climatology*, New York, John Wiley & Sons, 52.
- Park, S., 2009, Synchronicity between satellite-measured leaf phenology and rainfall regime in Hawaiian tropical forests, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75, 1231-1237.
- Park, S., 2010, A dynamic relationship between the leaf phenology and rainfall regimes of Hawaiian tropical ecosystems: a remote sensing approach, *Singapore Journal of Tropical Geography*, 31, 371-383.
- Potithec, S. and Yasuoka, Y., 2011, Application of the 3-PG model for gross primary productivity estimation in deciduous broadleaf forests: a study area in Japan, *Forests*, 2, 590-609.
- Potter, C., Klooster, S., Huete, A., and Genovesi, V., 2007, Terrestrial carbon sinks for the United States predicted from MODIS satellite data and ecosystem modeling, *Earth Interactions*, 11.

- Potter, C., Boriah, S., Steinbach, M., Kumar, V. and Klooster, S., 2008, Terrestrial vegetation dynamics and global climate controls in North America: 2001-05, *Earth Interactions*, 12.
- Remer, L. A., Tanre, D., Kaufman, Y. J., Ichoku, C., Mattoo, S., Levy, R., Chu, D. A., Holben, B. N., Dubovik, O., Smirnov, A., Martins, J. V., Li, R. R., and Ahmad, Z., 2002, Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean, *Geophysical Research Letters*, 29, 321-324.
- Remer, L. A., Kaufman, Y. J., Tanre, D., Mattoo, S., Chu, D. A., Martins, J. V., Li, R. R., Ichoku, C., Levy, R., Kleidman, R. G., Eck, T. F., Vermote, E., and Holben, B. N., 2005, The MODIS aerosol algorithm, products and validation, *Journal of Atmospheric Sciences*, 62, 947-973.
- Saleska, S. R., Miller, S. D., Matross, D. M., Goulden, M. L., Wofsy, S. C., da Rocha, H. R., de Camargo, P. B., Crill, P., Daube, B. C., de Freitas, H. C., Hutrya, L., Keller, M., Kirchhoff, V., Menton, M., Munger, J. W., Pyle, E. H., Rice, A. H., and Silva, H., 2003, Carbon in Amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses, *Science*, 302, 1554-1557.
- Schimel, D. S., House, J. I., Hibbard, K. A., Bousquet, P., Ciais, P., Peylin, P., Braswell, B. H., App, M. J., Baker, D., Bondeau, A., Canadell, J., Churkina, G., Cramer, W., Denning, A. S., Field, C. B., Friedlingstein, P., Goodale, C., Heimann, M., Houghton, R. A., Melillo, J. M., Moore III, B., Murdiyarso, D., Noble, I., Pacala, S. W., Prentice, I. C., Raupach, M. R., Rayner, P. J., Scholes, R. J., Steffen, W. L. and Wirth, C., 2001, Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems, *Nature*, 414, 169-172.
- Schuur, E. A. G., 2003, Productivity and global climate revisited: the sensitivity of tropical forest growth to precipitation, *Ecology*, 84, 1165-1170.
- Sophie, B., Pierre, D., and Eric, V. B., 2010, *GLOBCOVER 2009, Products Description and Validation Report*, ESA.
- Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A. J., Schlze, E. D., Rebmann, C., Moors, E. J., Granier, A., Gross, P., Jensen, N. O., Pilegaard, K., Lindroth, A., Grelle, A., Bernhofer, C., Grünwald, T., Aubinet, M., Ceulemans, R., Kowalski, A. S., Vesala, T., Rannik, Ü., Berbigier, P., Loustau, D., Guðmundsson, J., Thorgeirsson, H., Ibrom, A., Morgenstern, K., Clement, R., Moncrieff, J., Montagnani, L., Minerbi, S., and Jarvis, P. G., 2000, Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests, *Nature*, 404, 861-865.
- Wong, M. S., Nichol, J., and Lee, K. H., 2009, Modeling of aerosol vertical profiles using GIS and remote sensing, *Sensors*, 9, 4380-4389.
- Wong, M. S., Lee, K. H., Nichol, J. E., and Li, Z., 2010, Retrieval of aerosol optical thickness using MODIS 500x500m², a study in Hong Kong and the Pearl River delta region, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48, 3318-3327.
- Xiao, X. M., Hollinger, D., Aber, J., Goltz, M., Davidson, E. A., Zhang, Q., and Moore III, B., 2004a, Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest, *Remote Sensing of Environment*, 89, 519-534.
- Xiao, X. M., Zhang, Q., Braswell, B., Urbanski, S., Boles, S., Wofsy, S., Moore III, B., and Ojima, D., 2004b, Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data, *Remote Sensing of Environment*, 91, 256-270.
- 교신: 박선엽, 609-735, 부산광역시 금정구 부산대학교 63번길 2, 부산대학교 사범대학 지리교육과(이메일: spark@pusan.ac.kr, 전화: 051-510-2655)
- Correspondence: Sunyurp Park, Department of Geography Education, Pusan National University, 2 Busandaehak-ro 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea (e-mail: spark@pusan.ac.kr, telephone: +82-51-510-2655)
- 최초투고일 2013. 7. 22
수정일 2013. 8. 19
최종접수일 2013. 8. 23