

MODIS 식생지수에 미치는 센서 geometry의 영향과 센서 간 자료 호환성 검토

박선엽*

Compatibility of MODIS Vegetation Indices and Their Sensitivity to Sensor Geometry

Sunyu Park*

요약 : 지표의 식생활력도를 간접적으로 반영하는 위성 기반의 식생지수 자료를 연속적으로 확보하기 위해 자료합성법이 통상적으로 적용된다. 이는 자료합성을 통해 누락 자료나 신호 오류의 영향을 최소화함으로써 장기적인 식생지수 자료 구축이 가능해지기 때문이다. 또, 합성주기에 따라 두 개 이상의 위성 센서로부터 같은 시점에 생성된 식생지수 자료를 상호교호적으로 사용할 경우, 식생지수 자료 축적의 연속성과 안정성을 보다 더 강화할 수 있다. 본 연구는 식물생장 연구에 있어 위성시스템 간 자료 호환 가능성뿐만 아니라 MODIS 자료 취득 조건, 즉 태양과 센서의 천정각이 미치는 영향을 센서 geometry 측면에서 파악하여 장기적인 식생모니터링을 위한 자료 구축 개선에 기여하고자 한다. 연구 기간 중 센서천정각의 변화는 일정한 패턴을 보이지 않았고, 연도별로 불규칙한 등락을 나타냈다. 또, 동일 계절별로 분석한 결과에서도 계절에 따른 특징적 경년변화 패턴은 나타나지 않았다. 두 가지 분석 대상 자료인 NDVI와 EVI를 비교했을 때, EVI가 NDVI에 비해 더 안정된 결과를 보여주었고, 전반적으로 중위도 지역 식물생장의 계절적 특성을 전형적으로 보여주었다. 식생피복에 따른 NDVI-EVI 간 상관관계는 모두 유효한 결과를 얻었으나, 식생피복별로 상관도 차이를 보였고 상호 간에 선형 관계가 아닌 상단부에서 수렴되는 곡선 관계를 보여주었다. Terra와 Aqua 위성에 의해 오전과 오후에 각각 관측된 식생지수를 비교한 결과, 상관계수 범위는 NDVI의 경우 0.641-0.880로, EVI의 경우 0.747-0.963으로 나타나, NDVI자료에 비해 EVI자료의 호환성이 높은 것으로 조사되었다. 두 센서 기반의 식생지수 간 호환성 개선을 위해서는 두 자료 간의 회귀선으로부터 벗어나 있는 예외치에 대한 정밀한 분석이 과제로 남는다.

주요어 : MODIS, 센서 geometry, Terra, Aqua, 천정각

Abstract : Data composite methods have been typically applied to satellite-based vegetation index(VI) data to continuously acquire vegetation greenness over the land surface. Data composites are useful for construction of long-term archives of vegetation indices by minimizing missing data or contamination from noise. In addition, if multi-sensor vegetation indices that are acquired during the same composite periods are used interchangeably, data stability and continuity may be significantly enhanced. This study evaluated the influences of sensor geometry on MODIS vegetation indices and investigated data compatibility of two difference vegetation indices, the Normalized Difference Vegetation Index(NDVI)

이 논문은 2013년도 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@pusan.ac.kr

and the Enhanced Vegetation Index(EVI), for potential improvement of long-term data construction. Relationships between NDVI and EVI turned out statistically significant with variations among vegetation covers. Due to their curvilinear relationships, NDVI became saturated and leveled off as EVI reached high ranges. Correlation coefficients between Terra- and Aqua-based vegetation indices ranged from 0.747 to 0.963 for EVI, and from 0.641 to 0.880 for NDVI, showing better compatibility for EVI compared to NDVI. In-depth analyses of VI outliers that deviated from regression equations constructed from the two different sensors remain as a future study to improve their compatibility.

Key Words : MODIS, sensor geometry, Terra, Aqua, zenith angle

1. 서론

위성기반의 식생지수는 식물생장의 계절적 변화, 연도별 변화 및 경년변화를 모니터링 하는 데에 활발히 사용되고 있다. 특히, 시간해상도가 높은 미국해양대기국의 Advanced Very High Resolution Radiometer(AVHRR)와 미국항공우주국의 Moderate Resolution Imaging and Spectroradiometer(MODIS)는 식생의 시계열적인 변화를 살펴보기에 유리한 점으로 인해 비교적 광범위하게 응용되고 있다(Goward *et al.*, 1985; Malingreau *et al.*, 1989; Morton *et al.*, 2005; Marsett *et al.*, 2006; Morisette *et al.*, 2006; McRoberts and Tomppo, 2007). 매일의 자료를 획득할 수 있는 위성 센서라 하더라도 구름의 영향이나 센서의 노후화, 또는 기계적 결함 및 오작동으로 인해 일정지역에 대한 연속적인 모니터링에 제한이 따르게 된다. 이러한 한계를 보완하는 한 방법으로, 일정 기간 동안에 획득된 일별 자료를 합성하여 해당 단위 기간을 자료 획득의 간격으로 삼는 자료합성법이 1980년대부터 통상적으로 사용되고 있다(Holben, 1986).¹⁾ 가장 널리 이용되는 합성법은 최대치합성법(the maximum value composite, or MVC)으로, 이는 주어진 합성기간 내의 식생지수 관측치들 중 가장 높은 값을 합성 단위 주기의 대푯값으로 배정하는 방법이다. 이 방법은 구름의 영향, 반사각의 영향, 센서와 태양 간의 기하학적 조건의 영향, 대기층 두께의 영향 등을 부분적으로 상쇄하거나 감소시키는 장점으로 인해 연구자들이 비교적 광범위하게 채택하는 방

식이다. MODIS 자료의 경우, MVC가 가질 수 있는 오류, 즉 이상치(unusual high values) 또는 자료 편향 등을 보완하기 위해 반사각을 고려한 수정MVC(the constrained-view maximum value composite)가 제안되기도 하였다(Huete *et al.*, 2002). 자료의 연속성을 확보하기 위한 이러한 노력에도 불구하고, 주기적인 시간 간격별로 공간적으로 연속적이면서 오류가 배제된 자료를 구축하는 일은 여전히 어려운 과제로 남아 있다(Khlopenkov and Trishchenko, 2007; Townshend *et al.*, 2012). 최근에는 MVC에 대한 대안으로 계절별 합성자료를 생성함에 있어 합성기간 중 최대치가 아닌 중앙값을 채택하여 자료의 안정적인 대표성을 확보하고자하는 연구도 소개되고 있다(Flood, 2013).

시간해상도가 높은 위성자료를 이용한 주기별 자료 합성법 외에 자료 연속성의 확장이 가능한 방법으로는 유사한 제원을 가진 위성 센서들 간의 자료 호환을 제시할 수 있다(Jacob *et al.*, 2004; Pu *et al.*, 2006; Miura *et al.*, 2008). 미국항공우주국이 운영하는 MODIS 시스템은 오전과 오후에 자료를 각각 획득하는 Terra와 Aqua의 두 가지 자매 시스템으로 구성되는데, 가용한 자료는 각각 2000년과 2003년부터 축적되어 오고 있다. 이들 센서는 신호의 보정 알고리즘 정확도를 높인 것으로 자료의 질이 AVHRR과 같은 이전 센서에 비해 보다 향상된 장점을 지니고 있다(Miura *et al.*, 2000). 각 위성시스템은 동일한 파장대에 걸쳐 자료를 획득함으로써 오전과 오후 시간대에 대한 지표 환경 자료를 상호보완 할뿐만 아니라 위성 자료 축적의 연속성을 강화하는 장점을 지니

고 있다(Xiong *et al.*, 2011). MODIS 자료를 통해 두 개의 표준적인 식생지수 자료, 즉 Normalized Difference Vegetation Index(NDVI)와 Enhanced Vegetation Index(EVI)가 생성되는데, AVHRR과 같은 기존 센서가 제공하던 자료에 비해 지표식생의 상태에 대한 보다 정확한 정보를 효과적으로 기록하고 있다(Huete *et al.*, 2011).

식생지수 생성과정은 수직에 가까운(near nadir) 반사각 기반의 자료로서, 구름 영향이 제거된 수관층(top-of-canopy)의 녹색도(greenness) 추출을 지향하고 있지만, 국지적으로 분포하는 구름, 그늘, 에어로졸, 대기효과, 센서와 태양의 입사각 조건 등으로 인해 비생물적인 신호 오류가 위성자료 내에 상존한다. 또, 식생지수 자료의 정확도는 계절적, 지리적 변화에 따라 직간접적인 영향을 받기 때문에 불확실성의 원인이 되는 개별 요인의 영향을 평가하기란 매우 어려운 일이다(Huete and Liu, 1994; Miura *et al.*, 2000; Huete *et al.*, 2011). 하지만, MODIS VI 자료의 경우에는 자료의 질을 나타내는 일련의 품질평가 자료가 추가적으로 탑재되어 있어서 신호 오류를 일으키는 복합적인 불확실성 요인을 평가하여 감소시킬 수 있는 가능성을 열어 놓았다(Gao *et al.*, 2003).

각 식생지수 자료는 위성센서와 태양의 상대적 위치에 따른 기하학적 조건을 함께 포함하고 있다. 즉, 지표면을 기준으로 위성센서, 태양이 이루는 입사각 정보가 위성자료의 독립된 레이어로 저장되어 있다. 이러한 추가적 요인이 식생지수 변화에 미치는 영향을 고려해 볼 수 있지만 이에 대한 정량적 평가는 아직 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구는 식물성장 연구에 있어 위성시스템 간 자료 호환 가능성뿐만 아니라 위성 자료 취득 조건, 즉 태양과 센서의 천정각이 미치는 영향을 파악하여 장기적인 식생모니터링을 위한 자료 구축 개선에 기여하고자 한다.

2. 연구 방법

1) 연구 지역

본 연구는 남북한을 포함한 한반도를 대상으로 하였다(그림 1). 한반도는 남북방향으로 약 10도 범위(33°N-43°N)에 걸쳐 있으며, 연평균 기온은 2.1°C에서 15.9°C 범위에 있다. 강수량의 대부분은 몬순과 태

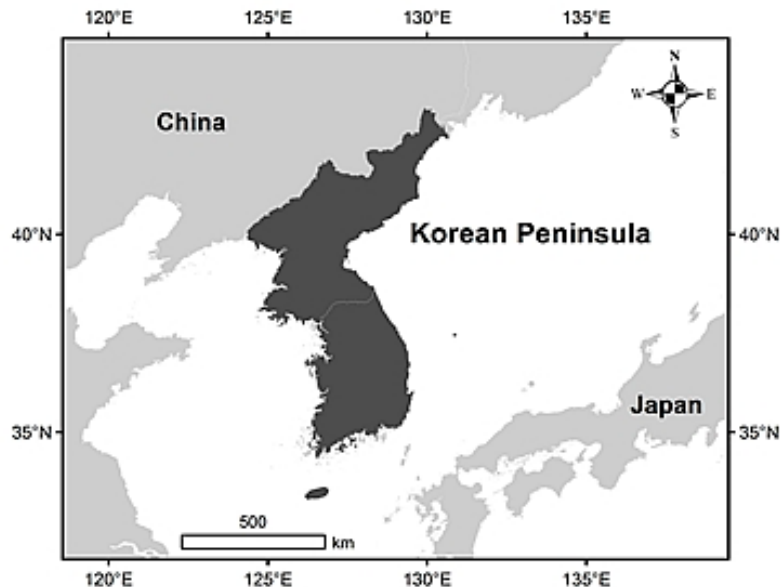


그림 1. 연구지역

풍의 영향으로 여름철에 집중되어 있는데, 연수량의 약 60%가 6월에서 9월에 발생한다. 겨울철에는 시베리아 고기압의 영향권에 놓여 한랭건조한 북서풍이 지배적으로 나타난다. 1월 평균기온은 대부분 지역에서 영하를 기록하며, 1월 강수량은 연강수량의 10%에 못미친다(Nieuwolt, 1977).

2) 식생지수자료 획득 및 처리

MODIS는 2000년부터 모두 36개의 서로 다른 채널별로 자료를 획득하고 있는데, 채널에 따라 공간해상도는 250m, 500m, 또는 1km로 달라진다(Barnes *et al.*, 1998; Kaufman *et al.*, 1998). 본 연구에 사용된 자료는 MODIS 자료군 중 16일 주기로 합성된 식생지수 자료인 MOD13Q1과 MYD13Q1으로 미국 지질조사국 Land Process Distributed Active Archive Center(LP DAAC)로부터 수집되었다. 이 자료는 MODIS 센서로부터 생성되는 자료인데, 오전에 자료를 획득하는 Terra와 오후에 획득하는 Aqua 위성에 각각 탑재된다. Aqua 위성은 Terra 위성보다 늦게 운영되기 시작하여 2003년부터 자료를 축적하고 있다. 분석에 사용된 Terra와 Aqua 자료는 위성 운영 시작부터 2010년까지 각각 11년(2000–2010)과 8년(2003–2010) 동안의 식생지수 자료이다.

MODIS 자료는 격자형태의 tile 단위로 구성되는데, 연구 지역인 한반도 전체를 포함하기 위해서 16일의 합성주기별로 모두 3개의 tile을(h27v04, h27v06, h28v05) 수집하여 하나의 파일로 접합하였다.²⁾ 자료 접합에는 미국지질조사국에서 배포하는 MODIS Reprojection Tool(MRT)을 적용하였다. 각 타일 자료에는 250×250m 공간해상도를 갖는 12개의 레이어가 존재한다. 이 중 식생지수인 NDVI와 EVI 자료를 추출하였다. NDVI는 1980년대 개발된 이후 가장 광범위하게 사용되는 식생지수로, 식생지표피복비율(vegetation percent cover), 엽면적지수(leaf area index, or LAI), 유효광합성 복사량비(fraction of photosynthetically active radiation, or fPAR) 등 식물활동과 강한 상관성을 가지며 서로 다른 두 개 파장대의 반사율을 반영하여 계산된다(Tucker and Sellers,

1986):

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

ρ_{nir} 와 ρ_{red} 는 각각 근적외선과 적색 파장대의 반사율이다. EVI는 MODIS 시스템에서 새로 도입된 식생지수로 적색파장 에너지의 반사와 토양 반사에 미치는 대기 에어로졸의 영향을 최소화시키기 위해서 청색 파장 신호(ρ_{blue})를 추가로 적용하였다. 이러한 개선을 통해 EVI는 NDVI가 가지고 있었던 신호 포화(saturation) 문제를 일정정도 해결하는 장점을 가지고 있다. 엽면적지수(leaf area index, or LAI)가 3이상에 이르는 삼림환경에서는 식물생물량 또는 광합성 활동을 가리키는 NDVI의 효용이 크게 떨어지는데, EVI는 에어로졸과 토양반사의 영향을 감소시켜 전체적으로 식생밀도가 조밀한 곳에서 NDVI보다 식생변화에 더 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다(Townshend *et al.*, 1991; Liu and Huete 1995). 이러한 장점으로 EVI는 현재 전지구적 규모의 식생모니터링에 널리 사용되고 있다(Huete *et al.*, 2002, Xiao *et al.*, 2006, Potter *et al.*, 2008):

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

최근 연구 결과는, MODIS기반의 식생지수들은 생태계 환경에 따라 식물생장 신호에 민감하게 반응하는 정도가 서로 상이하게 나타나기 때문에, 기후환경에 적합한 식생지수를 선별하여 사용해야 함을 보고하였다(Park, 2010; Park and Miura, 2011). 한반도 지역의 경우, 주요 산림환경을 대표할 수 있는 식생지수에 대한 면밀한 조사보고가 없는 실정으므로, 이에 대한 비교 분석이 필요하다. 식생지수의 계산 결과는 구름의 영향을 직접적으로 받기 때문에 자료 내부에 포함된 자료 질(VI quality) 레이어 정보를 이용하여 구름 영향이 있는 화소를 제거하였다.

MODIS 식생지수의 식생피복률 분석을 위하여 유럽 항공우주국(European Space Agency; ESA)에서 제공하고 있는 전지구적 지표피복 분류자료인

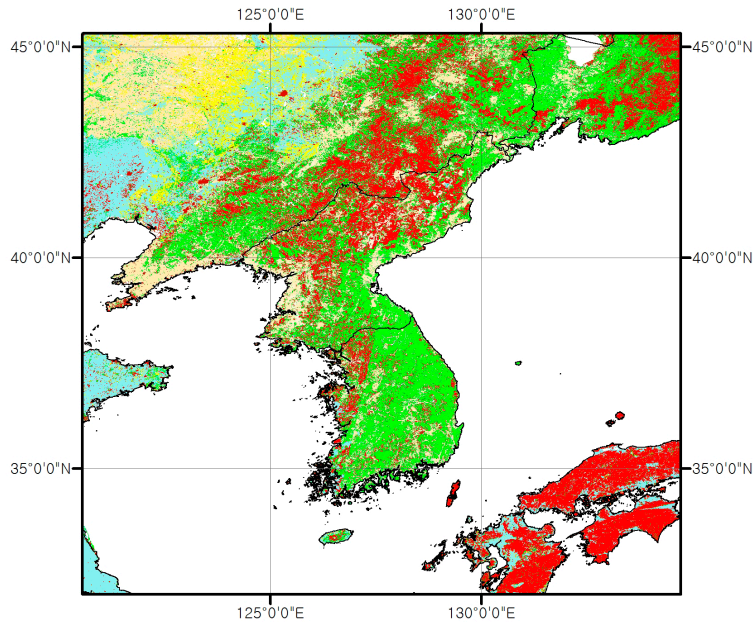


그림 2. GlobCover 식생피복도, 20개 클래스 유형을 7개 식생으로 단순화하였다(열은 청색: 경작지, 노란색: 혼합림, 녹색: 활엽수림, 빨간색: 상록수림, 연두색: 초지, 갈색: 관목림, 분홍색: 습지).

GlobCover2009 (Sophie *et al.*, 2010)를 사용하였다. 이 자료는 EnviSAT의 Medium Resolution Imaging Spectrometer(MERIS) 센서로 관측된 전 지구의 지표면을 22개 서로 다른 지표피복으로 분류한 것이며, 공간해상도는 약 300m 이다. 그림 2는 한반도 지역의 토지피복 분류를 단순화한 것이며, 본 연구에서는 모두 7가지 식생피복으로 재분류하였다. 식생자료 레이어 외에도 파일 내에는 태양과 센서의 입사각 정보를 담은 태양천정각(solar zenith), 센서천정각(view zenith angle), 상대방위각(relative azimuth angle) 레이어가 포함되어 있다. 각 분석 대상 자료의 이미지 분석 및 통계 작업을 위해 Erdas Imagine 9.1 version 이 사용되었다.

3) 자료 획득의 기하학적 조건

MODIS는 whiskbroom형 센서로 반사경을 좌우로 스캔하며 궤도를 운행하기 때문에 스캔의 각도에 따라 각 화소의 크기가 달라지고 태양에 대한 센서의 상대적인 위치에 따라 식생지수에 영향을 미치게 된

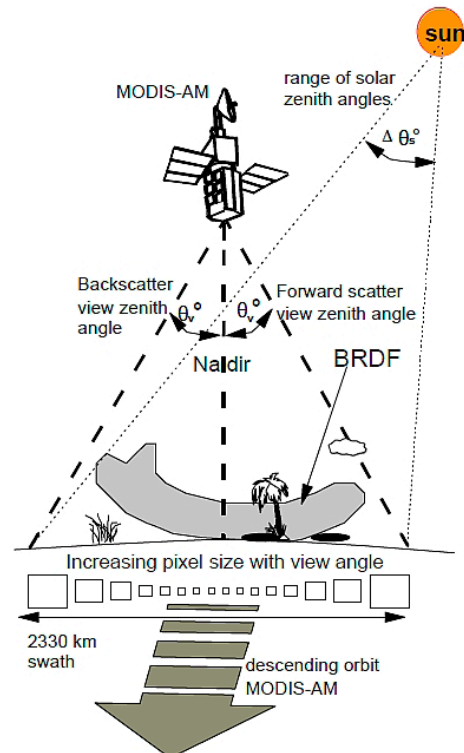


그림 3. MODIS자료 획득의 기하학적 조건(Huete *et al.*, 1999).

다(그림 3). 16일 주기 식생지수 자료인 MOD13Q1과 MYD13Q1은 각 합성 파일별로 화소의 지리적 위치에 따라 자료 획득일(the pixel acquisition day of the year)이 달라지기 때문에, 태양과 센서의 천구 상 위치가 식생지수에 주는 영향을 고려할 필요가 있다. 태양천정각(solar zenith angle)은 지면에서 수직방향과 태양이 이루는 각도이고, 센서천정각(view zenith angle)은 지면에서 수직방향과 위성센서가 이루는 각도를 말하며, 상대방위각(relative azimuth angle)은 센서와 태양의 지면에 대한 두 연직선 사이의 각도를 의미한다. 본 연구는 MODIS 자료 폭(swath width)이 2330km에 달하고, 센서의 시야각(viewing angle)도 $\pm 55^\circ$ 범위를 감안할 때 태양-센서-지표 간의 기하학적 관계가 식생지수에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

4) 센서 간 호환 가능성

한반도를 대상으로 한 선행 연구에서 제시된 통계치를 살펴보면, 2주 주기 합성자료(biweekly composites)의 경우, 강수가 집중되는 7월과 8월에는 최대 40% 이상의 자료가 소실되는 것으로 나타났다(Park, 2013). 따라서, 공간적으로 연속적인 식생지수 자료를 확보하기 위해서는 2주보다 더 긴 주기성을 가진 합성자료(예, monthly composites)를 사용하거나, 오전과 오후 자료, 즉 Terra와 Aqua에 의해 취득된 자료

를 호환하는 방안을 고려해 볼 수 있다. 식물계절성 분석을 위한 주기로 볼 때, 월주기는 시간해상도가 현격히 떨어지는 큰 약점이 있기 때문에, 본 연구에서는 서로 다른 시간대에 취득된 오전과 오후의 식생지수를 모두 고려하여 상호 보완하는 방법을 타진하였다.

3. 연구결과 및 논의

1) 태양과 센서의 기하학적 관계

16일 주기 자료의 태양천정각(solar zenith angle) 평균값은 예상대로 계절에 따라 일정한 주기를 보여 주었다. 즉, 태양고도가 높은 하절기에는 낮게, 동절기에는 높게 관측되었다. 태양천정각의 경년변화 역시 일정하게 나타났고, 전체적으로 MODIS 자료에 기록된 태양천정각에는 특이점이 존재하지 않았다. 센서천정각(view zenith angle)의 지난 11년간 변화를 살펴본 결과, 전반적으로 점진적인 감소 추세를 나타내었다(그림 4). 16일 주기 자료별로 센서천정각의 평균값이 증가할수록 표준편차가 증가하였지만 상관도는 높지 않았다($r=0.305$).

연구 기간 중 센서천정각의 변화는 일정한 패턴을 보이지 않았고, 연도별로 불규칙한 등락을 나타냈다. 동일 계절별로 11년간의 추이를 살펴본 결과, 계절에

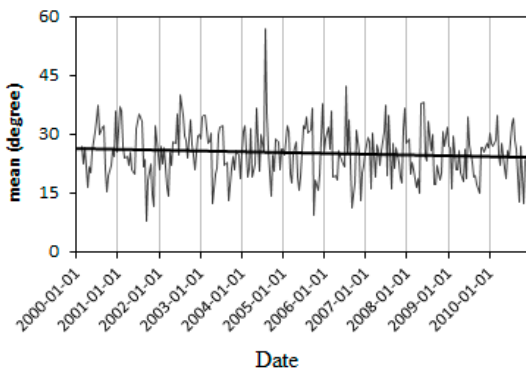


그림 4. 평균 센서천정각의 경년변화(2000-2010). 전체 기간에 대한 추세선이 함께 표시되었다.

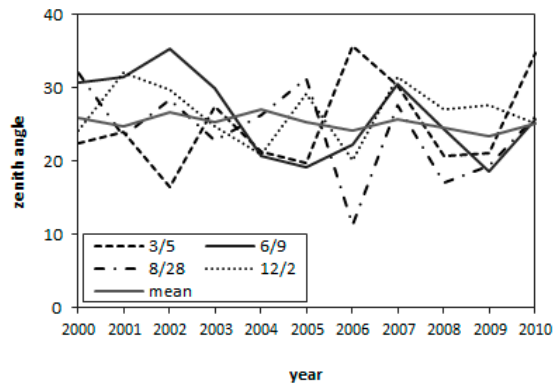


그림 5. 동일계절별 센서천정각의 경년변화(2000-2010).

다른 경년변화 역시 특징적인 패턴 없이 불규칙적인 변화를 나타냈다(그림 5). 계절별 식생지수의 변동에 미친 센서천정각의 영향은 지배적으로 나타나지 않았다고 판단되지만, 계절별 세부적 관련성은 추가적인 분석을 통해 규명해 볼 가치가 있다. 식생 생육기간의 시작과 종료 시점에 관한 최근 연구는 지역과 기후환경에 따라 수일에서 일주일 이상 변화상이 나타난다고 보고하고 있는 만큼, 이와 관련된 센서천정각의 영향은 기후환경 변화를 지시하는 식물계절학 신호 탐지 영역에서 보다 구체적으로 다루어져야 할 것으로 판단된다(Jeong *et al.*, 2011).

2) 식생피복별 식생지수 시계열 변화

지난 11년간의 식생지수 시계열 분석 결과, 전체적으로 NDVI에 비해 EVI가 더 안정된 관측값을 나타냈으며, 중위도 지역의 계절적 특성을 전형적으로 보여주었다. 혼합림의 경우, 식생지수 사이클의 규칙성이 다른 식생피복 유형에 비해 떨어졌다. 이는, 상이한 수종의 혼합으로 식물계절학적 신호가 선명하지 못한 결과로 판단된다. 한반도 전체를 분석하기 위해 사용한 GlobCover 자료의 분류 정확도는 지리적 분석 단위 또는 지역적 범위에 따라 변동 폭이 크기 때문에 상대적으로 면적이 작은 한반도의 경우, 식생피복 자료의 정확도에 따라 식생지수의 계절적 특징이 민감하게 영향을 받을 가능성이 있다(Yiming *et al.*, 2012). 남한의 경우, 환경부에서 제시하는 토지피복도는 공간해상도 30m 수준에서 대분류, 중분류, 소분류 등 3가지 서로 다른 세부 분류 수준에 따라 제작 및 배포되어 있다. 따라서 남한 지역에 국한된 별도 분석을 진행한다면 보다 명료한 식생지수의 시계열 특성을 파악할 수 있을 것으로 전망된다.

식생지수 자료 처리에서 흔히 적용되는 단순화 또는 일반화(smoothing)를 통한 오류 제거로 특징적인 계절적 패턴 변화를 추출하는 것 외에, 대기의 질과 관련하여 에어로졸의 역할에 대하여 논의할 필요가 있다. 계절적으로 국한되어 있던 황사와 같은 분진 확산이나 대규모 산불, 또는 지역적인 화산폭발 등으로 인해 식생활동에 미치는 외부적 요인이 점차 중요해

지고 있다(이동하 외, 2006; 이권호, 2011; 이권호, 2012; Lee *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2006; Koren *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2009; Torres *et al.*, 2010). 일반적으로 적용되던 식생지수 변화 곡선의 단순화 과정을 일괄적으로 사용할 경우, 식생활동에 실질적으로 미치는 대기 에어로졸 영향이 배제되어 결과적으로 환경변화-식생 반응 간의 관계가 왜곡될 소지가 있다. 한반도를 대상으로 한 최근의 분석 사례를 보면, 한반도 일대의 광학두께의 시계열변화는 경년변화뿐만 아니라 계절적 특징을 강하게 나타내고 있고, 광학두께의 연중 변화폭이 식생지수의 변화폭과 미약하나마 상관관계를 보인 점을 볼 때, 지역적인 에어로졸 농도변화가 식생활동에 직간접적인 영향을 주고 있을 것으로 판단된다(박선엽, 2013).

3) 식생지수 간 비교 결과

식생피복에 따른 NDVI-EVI 간 상관관계는 모두 유효한 결과를 얻었으나, 식생피복별로 상관도 차이를 보였다. 다수 수종이 혼합되어 있는 혼합림이 가장 낮은 상관도를 보였고(Terra $r=0.725$, Aqua $r=0.776$), 비교적 식생구조가 단순한 습지(Terra $r=0.945$, Aqua $r=0.988$)와 초지(Terra $r=0.905$, Aqua $r=0.905$)의 경우 상관도가 높게 나타났다(그림 6). 두 식생지수를 식생피복별로 상호 비교한 결과, 선형 관계가 아닌 상단부에서 수렴되는 곡선 관계를 보여주었다. 즉, 다층적인 수관 구조가 지배적이지 않은 한반도 환경에서도 NDVI의 포화현상(saturation)이 일어나 EVI의 상대적인 유용성을 보여주었다. 하지만, EVI 유효값의 범위는 여전히 NDVI에 비해 좁고, 기후환경에 따라 직선 또는 곡선형의 상관관계가 전형적으로 나타난다고 보기에는 논의의 여지가 있기 때문에 앞으로 관련 연구 성과의 축적이 필요하다.

4) 센서 간 호환 가능성 비교

MODIS NDVI와 EVI 자료를 사용하여 Terra와 Aqua 위성 간 자료값 비교 분석을 실시하였다. 그림 7에서 보여주듯이, 두 자료 간 상관도가 유효하게

나타났다. 논리적으로 볼 때, 오전과 오후 관측값으로 구분할 수 있는 두 위성 센서 간의 식생지수 차이는 크지 않아야 한다. 상관계수 범위는 NDVI의 경우 0.641-0.880로, EVI의 경우 0.747-0.963으로 나타나, NDVI자료에 비해 EVI자료의 호환성이 높은 것으로 조사되었다. 구름의 영향이 상대적으로 큰 연구 지역에서 시공간적으로 연속적인 자료 생성을 위해서는 동일 날짜에 획득된 이 두 식생지수의 호환이 큰 중요성을 갖는다. 이는, 센서 간 자료 호환을 통해 구름으로 인해 소실되는 화소의 수를 크게 줄이고, 장기 간의 자료 연속성을 확보할 수 있기 때문이다. 그림 7에서 볼 수 있듯이, 두 자료 간에 생성되는 회귀선으로부터 상대적으로 벗어나 있는 예외치에 대한 정밀한 분석을 통해 센서 간 호환성 개선 방안이 필요하다 (Park, 2013).

4. 결론

지난 11년간의 식생지수를 시계열 분석한 결과, 전체적으로 NDVI에 비해 EVI가 더 안정된 관측값을 나타내었다. 두 식생지수 모두 중위도 지역의 계절적 특성을 전형적으로 보여주었는데, 혼합림의 경우, 식생지수 사이클의 규칙성이 다른 식생피복 유형에 비해 떨어졌다. 이는 상이한 수종의 혼합으로 식물계절학적 신호가 상대적으로 선명하게 나타나지 못한 결과로 판단된다. 식생피복에 따른 NDVI-EVI 간 상관관계 분석에서도 다수 수종이 혼합되어 있는 혼합림은 가장 낮은 상관도를 보인 반면(Terra, $r=0.725$, Aqua, $r=0.776$), 비교적 식생구조가 단순한 습지(Terra, $r=0.945$, Aqua, $r=0.988$)와 초지(Terra,

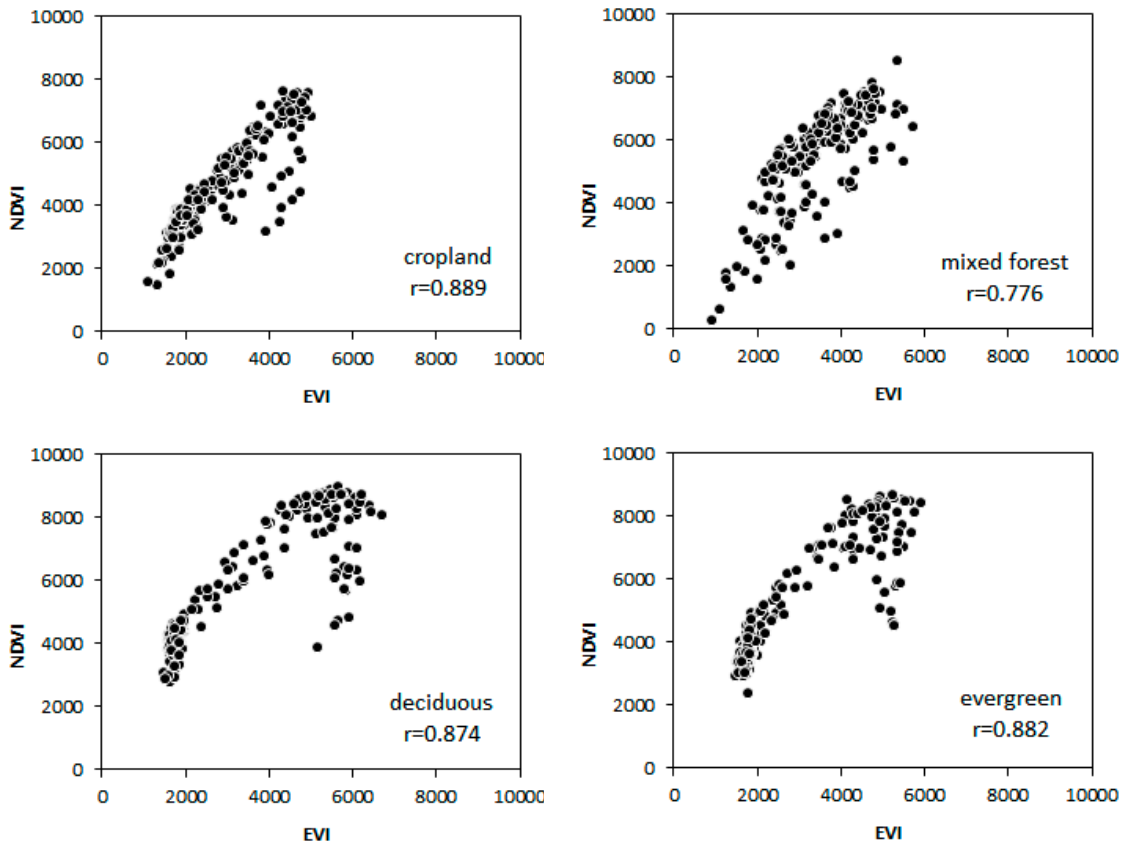


그림 6. 4개 주요 식생피복에 대한 두 식생지수 NDVI와 EVI 간의 상관관계(Aqua).

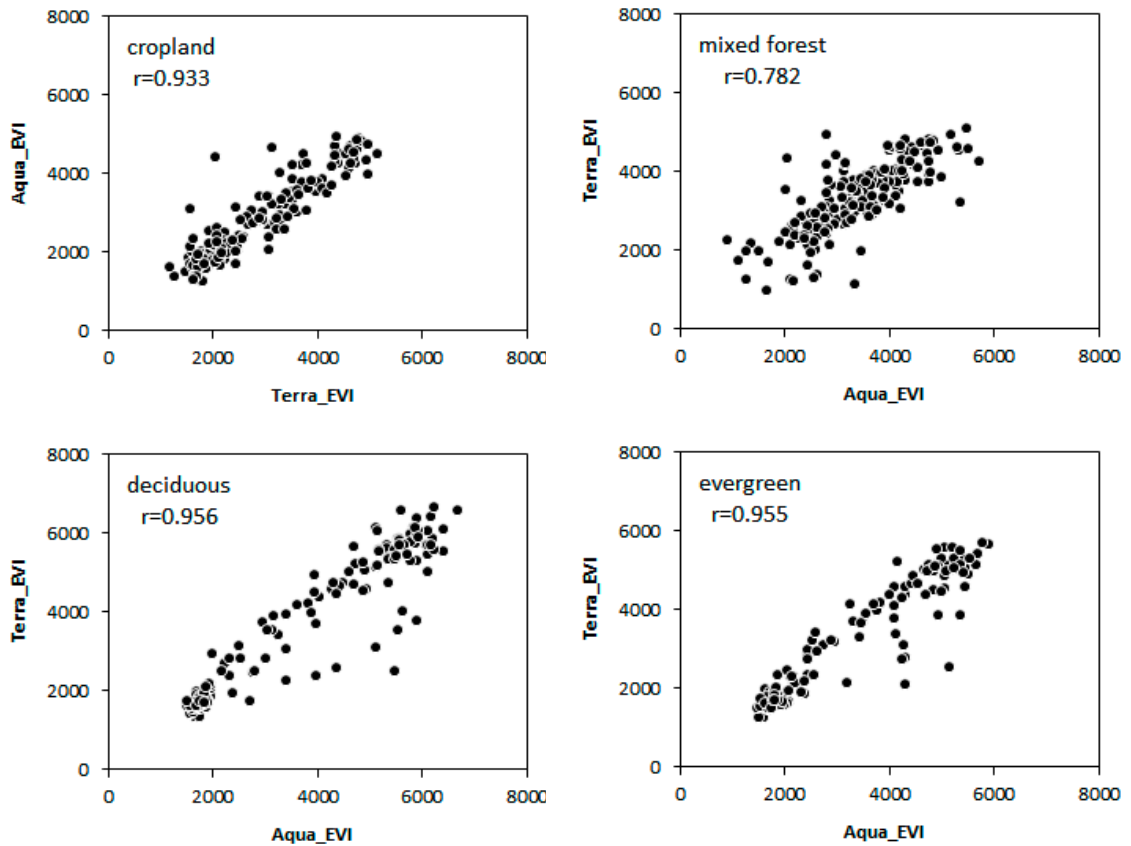


그림 7. 4개 주요 식생 피복을 대상으로 한 Terra와 Aqua 위성 간 식생지수(EVI) 비교.

$r=0.905$, Aqua, $r=0.905$)의 경우 상관도가 높게 나타났다. 두 식생지수의 비교 분석에서는 NDVI의 포화현상(saturation)이 일어나 EVI의 상대적인 유용성을 보여주었다. 즉, 다층적인 수관 구조가 지배적이지 않은 한반도 환경에서도 NDVI는 EVI가 높아질수록 선형 관계가 아닌 상단부에서 수렴되는 곡선 관계를 보여주었다. 하지만, EVI 유효값의 범위는 여전히 NDVI에 비해 좁고, 두 식생지수 간에 직선 또는 곡선형의 상관관계가 전형적으로 나타난다고 보기에 논의의 여지가 있기 때문에 향후 추가적 연구가 필요하다. 각 식생지수별로 오전과 오후 위성 시스템인 Terra와 Aqua의 자료값을 비교 분석한 결과, 두 위성 자료간의 호환성의 측면에서 식생지수별로 차이를 보였다. 상관계수 범위는 NDVI의 경우 0.641-0.880로, EVI의 경우 0.747-0.963으로 나타나, NDVI자료

에 비해 EVI자료의 호환성이 높은 것으로 조사되었다. 구름의 영향이 상대적으로 크고, 장마를 중심으로 강우일수가 여름철에 집중되어 있는 기후적 특징을 갖는 한반도 지역에서 시공간적으로 연속적인 자료 생성을 위해서는 동일 날짜에 획득된 두 식생지수의 호환이 큰 중요성을 갖는다. 즉, 센서 간 자료 호환성을 개선함으로써 구름으로 인해 소실되는 화소의 수를 크게 줄이고, 장기적인 자료 연속성을 확보할 수 있다. 1980년대부터 획득되어온 위성기반의 식생지수 자료의 가치를 극대화하기 위해서는 지난 30여년에 걸쳐 축적된 자료를 단절 없이 연장하고 상이한 센서로부터 야기되는 편차와 변이를 최소화하여 자료 사용의 호환성을 높이는 일이 선행되어야 한다. 식생지수 간 호환성 확보를 위해 극복해야 할 과제로는 개별 위성 센서에서 획득된 식생지수 분포 상의 예외

치의 처리문제이다. 자료 간 상관관계로부터 추출되는 회귀선으로부터 상대적으로 벗어나 있는 예외치에 대한 정밀한 분석을 통해 예외치의 탐지와 주요 발생원인, 그리고 처리 방안에 대한 후속 연구가 필요하다.

사사

본 연구에 사용된 위성 자료의 처리와 분석 결과 정리에 도움을 준 부산대학교 지리교육과 학부과정의 이재성과 진창우에게 감사드립니다.

주

- 1) 1980년대 중반까지 축적된 AVHRR 기반의 식생지수 관련 중요 연구 성과물이 원격탐사 전문 저널인 *International Journal of Remote Sensing*의 1986년 7권 11호에 특집으로 출간되었다.
- 2) MODIS 자료는 운영상의 효율을 기하기 위해 가로, 세로 약 10도가량의 격자(grid)로 분할하여 관리되는데, 이 격자 단위를 tile이라 한다. 대부분의 자료들은 시누소이드 도법(Sinusoidal projection)에 기반 해 있는데, 지리적으로 좌상단부터 동쪽 방향으로, 그리고 남쪽 방향으로 가면서 각각 수평과 수직 방향의 tile 번호가 부여된다. 연구 대상 지역인 한반도 전역을 포함시키기 위해서는 모두 세 개의 타일, 즉 이웃해 있는 h27v04, h27v05, h28v05를 상호 접합하여야 한다.

참고문헌

박선엽, 2013, “위성기반의 한반도 식물계절학적 패턴과 대기 에어로졸의 시계열 특성 분석,” *대한지리학회지*, 48, 497-508.

이권호, 2011, “지구관측 위성자료를 이용한 주요 대기 에어로졸 성분의 공간분포 분석,” *한국지리정보학회지*, 14, 109-127.

이권호, 2012, “동북아시아 지역의 바이오매스 연소 활동

이 지역 대기 환경에 미치는 영향,” *한국지리정보학회지*, 15, 184-196.

이동하·이권호·김정음·김영준, 2006, “동북아시아 지역에서 Terra/MODIS 위성자료를 이용한 2000-2005년 동안의 대기 에어로졸 광학두께 변화 특성,” *Atmosphere*, 16, 85-96.

Barnes, W.L., Pagano, T.S., and Salomonson, V.V., 1998, Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) in EOS-AM1, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 457-465.

Flood, N., 2013, Seasonal composite Landsat TM/ETM+ images using the medoid (a multi-dimensional median), *Remote Sensing*, 5, 6481-6500.

Gao, X., Huete, A., and Didan, K., 2003, Multisensor comparisons and validation of MODIS vegetation indices at the semiarid Jornada Experimental Rang, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 2368-2381.

Goward, S.N., Tucker, C.J., and Dye, D.G., 1985, North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer, *Vegetation*, 64, 3-14.

Holben, B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1417-1434.

Huete, A.R., and Liu, H., 1994, An error and sensitivity analysis of the atmospheric- and soil-correcting variations of the NDVI for MODIS-EOS, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 3, 897-905.

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., Didan, K., von Leeuwen, W., Miura, T., and Glenn, E., 2011, MODIS vegetation indices, in Ramachandran, B., Justice C. O., and Abrams, M. J., (eds.), *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, Springer, New York, 579-602.

- Jacob, F., Petitcolin, F., Schmugge, T., Vermote, E., French, A., and Ogawa, K., 2004, Comparison of land surface emissivity and radiometric temperature derived from MODIS and ASTER sensors, *Remote Sensing of Environment*, 90, 137-152.
- Jeong, S., Ho, C., Gim, H., and Brown, M.E., 2011, Phenology shift at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008, *Global Change Biology*, 17, 2385-2399.
- Kaufman, Y.J., Herring, D.D., Ranson, K.J., and Collatz, G.J., 1998, Earth observing system AM1 mission to earth, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1045-1055.
- Khlopenkov, K.V. and Trishchenko, A.P., 2007, SPARC: Cloud, Snow, and Cloud Shadow Detection Scheme for Historical 1-Km AVHRR Data Over Canada, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24, 322-343.
- Koren, I., Remer, L.A., and Longo, K., 2007, Reversal of trend of biomass burning in the Amazon, *Geophysical Research Letters*, 34, L20404. doi:10.1029/2007GL031530.
- Lee, K.H., Kim, J.E. Kim, Y.J. Kim, J., and von Hoyningen-Huene, W., 2005, Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003, *Atmospheric Environment*, 39, 85-99, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.09.032.
- 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 Kim, Y., Platt, U., and Iwahashi, M. B.(eds.), *Atmospheric and Biological Environmental Monitoring*, Springer, New York, 13-38.
- Liu, H.Q. and Huete, A.R., 1995, A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 457-465.
- Malingreau, J.P., Tucker, C.J., and Laporte, N., 1989, AVHRR for monitoring global tropical deforestation, *International Journal of Remote Sensing*, 10, 855-867.
- Marsett, R.C., Qi, J.G., Heilman, P., Biedenbender, S.H., Watson, M.C., Amer, S., Wetz, M., Goodrich, D., and Marsett, R., 2006, Remote sensing for grassland management in the arid Southwest, *Rangeland Ecology and Management*, 59, 530-540.
- McRoberts, R.E. and Tomppo, E.O., 2007, Remote sensing support for national forest inventories, *Remote Sensing of Environment*, 110, 412-419.
- Miura, T., Huete, A.R., and Yoshioka, H., 2000, Evaluation of sensor calibration uncertainties on vegetation indices for MODIS, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(3), 1399-1409.
- Miura, T., Yoshioka, H., Fujiwara, K., and Yamamoto, H., 2008, Inter-comparison of ASTER and MODIS surface reflectance and vegetation index products for synergistic applications to natural resource monitoring, *Sensors*, 8, 2480-2499
- Morissette, J.T., Jarnevich, C.S., Ullah, A., Cai, W.J., Pedelty, J.A., Gentle, J.E., Stohlgren, T.J., and Schnase, J.L., 2006, A tamarisk habitat suitability map for the continental United States, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4, 11-17.
- Morton, D.C., DeFries, R.S., Shimabukuro, Y.E., Anderson, L.O., Espirito-Santo, F.D.B., Hansen, M., and Carroll, M., 2005, Rapid assessment of annual deforestation in the Brazilian Amazon using MODIS data, *Earth Interactions*, 9, DOI:10.1175/EI139.1.
- Nieuwolt S., 1977, *Tropical Climatology*, John Wiley & Sons, New York, NY, 52.
- 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.
- Park, S. and Miura, T., 2011, Moderate-resolution imaging spectroradiometer-based vegetation indices and

- their fidelity in the tropics, *Journal of Applied Remote Sensing*, 5, 053555, DOI10-1117/1.3643696.
- Park, S., 2013, Cloud and cloud shadow effects on the MODIS vegetation index composites of the Korean Peninsula, *International Journal of Remote Sensing*, 34, 1234-1247.
- 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.
- Pu, R.L., Gong, P., Michishita, R., and Sasagawa, T., 2006, Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval, *Remote Sensing of Environment*, 104, 211-225.
- Sophie, B., Pierre, D., and Eric, V.B., 2010, *GLOBCOVER 2009, Products Description and Validation Report*, ESA.
- Torres, O., Chen, Z., Jethva, H., Ahn, C., Freitas, S.R., and Bhartia, P.K., 2010, OMI and MODIS observations of the anomalous 2008-2009 Southern Hemisphere biomass burning seasons, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 3505-3513.
- Townshend, J.R.G., Justice, C.O., Li, W., Gurney, C., and McManus, J., 1991, Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future capabilities, *Remote Sensing of Environment*, 35, 243-255.
- Townshend, J.R.G., Masek, J.G., Huang, C., Vermote, E.F. Gao, F., Channan, S., Sexton, J.O., Feng, M., Narasimhan, R., Kim, D., Song, K., Song, D., Song, X.P., Noojipady, P., Tan, B., Hansen, M.C., Li, M., and Wolfe, R.E., 2012, Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges, *International Journal of Remote Sensing*, 5, 373-397.
- Tucker, C.J. and Sellers, P.J., 1986, Satellite remote sensing of primary production, *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1395-1416.
- Xiao, X. M., Hagen, S., Zhang, Q., Keller, M., and Moore III, B., 2006, Detection leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multi-temporal MODIS images, *Remote Sensing of Environment*, 103, 465-473.
- Xiong, X., Wolfe, R., Barnes, W., Guenther, B., Vermote, E., Salcous, N., and Salomonson, V., 2011, Terra and Aqua MODIS design, radiometry, and geometry in support of land remote sensing, in Ramachandran, B., Justice C.O., and Abrams, M.J.(eds.), *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, Springer, New York, NY, 133-166.
- Yiming, A., Wenwu, Z., and Yinhu, Z., 2012, Accuracy assessments of the GLOBCOVER dataset using global statistical inventories and FLUXNET site data, *Acta Ecologica Sinica*, 32, 314-320.
- 교신: 박선엽, 609-735, 부산광역시 금정구 부산대학교 로 63번길 2, 부산대학교 사범대학 지리교육과(이메일: spark@pusan.ac.kr, 전화: 051-510-2655, 팩스: 051-510-2655)
- Correspondence: Sunyurp Park, Department of Geography Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea (e-mail: spark@pusan.ac.kr, telephone: +82-51-510-2655, fax: +82-51-510-2655)
- 최초투고일 2014. 1. 6
수정일 2014. 2. 11
최종접수일 2014. 2. 17