

MODIS자료를 이용한 북한 개마고원 및 백무고원 식생의 생물계절 모니터링

차수영*† · 서동조** · 박종화*

*서울대학교 환경대학원, **서울디지털대학교 컴퓨터공학부

Monitoring Vegetation Phenology Using MODIS in Northern Plateau Region, North Korea

Su-Young Cha*†, Dong-Jo Seo**, and Chong-Hwa Park*

*Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

**Department of Computer Engineering, Seoul Digital University

Abstract : Many researches have shown that NDVI provides a potential methods to derive meaningful metrics that describe ecosystem functions. In this paper we investigated the use of the MODIS NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) to monitor vegetation phenology dynamics of Northern plateau region, North Korea, during last 9-years (2000~2008). The findings of this paper can be summarized as follows. First, the length of growing season ranged from a low of 128 days in 2003 to a high of 176 days in 2000 and 2005. On the average of the last 9 years, the highest NDVI of 0.86 was marked on 28 July. Greenup onset occurs at the start of May, while the senescence begins between late September and October. Second, these annual vegetation cycles were compared with Seorak and Jiri Mountain regions of South Korea which have similar vegetation condition. Greenup onsets in South Korea were observed earlier than those of North Korea and the average time lag between the South and North Korea in Greenup was about 16 days which is a time-resolution of remotely sensed data. Sub-alpine conifers of such areas may be severely affected by the large of phenological characteristics due to the global warming trend.

Key Words : NDVI, Phenology, Vegetation, MODIS, Northern plateau, North Korea.

요약 : NDVI(Normal Difference Vegetation Index)는 식생의 광합성량과 직접적인 상호관련성이 있기 때문에 생태학적인 목적으로 이러한 지수들의 수많은 응용 가능성이 있다. 본 연구에서는 시계열 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI 자료를 이용하여 9년 동안 (2000~2008)의 북한 북부고원지대 아고산·고산 식생의 생물계절 특징을 모니터링 하였다. 5월 초순의 급격한 성장 이후 6월부터 8월까지 NDVI값은 0.8이상 지속적으로 유지되었고 최대 식생 생산량과 시기는 각각 0.86, 7월 28일 이었다. 식생 성장의 시작과 쇠퇴는 평균적으로 각각 5월 9일, 9월 30일이었고, NDVI 값은 각각 0.51,0.54이었다. 식생 성장 기간은 2003년에 128일로 가장 짧았고 2000년과 2005년은 176일

로 가장 길었다. 그리고, 동일한 수직적 산림 식생 환경을 가지고 있는 남한의 설악산과 지리산의 생물계절 특성과 비교하였다. 남북한의 아고산·고산 식생대는 약 30일 이상의 식생 생육 기간의 차이가 있었고 남한 지역이 MODIS 자료의 합성 주기인 16일만큼 개서시기가 빨랐다. 본 연구는 북한 고원지대 산림 식생의 시계열 및 생물계절적인 변화를 정량적으로 분석한 연구로서 그 의의가 클 뿐만 아니라 북한 지역의 산림 식생 라이브러리 작성 및 통일을 대비한 북한 자연환경계획 수립에 기초 베이스맵으로 활용될 수 있다.

1. 서론

북한의 산림 특히, 중·북부의 개마고원으로 대표되는 고원지역의 산림은 소위 '한반도의 허파'라고 일컬어지며, 북한에서도 아직 인간의 간섭이 최소화된 원시림을 간직하고 있는 지역이다(최삼규, 2006; MBC, 2005). 이들 지역은 남한에 비하여 상대적으로 풍부한 산림자원을 보유하고 있는 중요 지역임에도 불구하고 관련 자료가 매우 부족하다(염종민 외, 2008).

최근 북한에 발생한 대규모 가뭄과 홍수는 1990년대 동구권 사회주의의 붕괴 이후 악화된 식량난으로 인한 무분별한 산지 개간과 더불어 기후변화로 인한 국지적 기상재해로 볼 수 있는데(Cha and Park, 2007), 지난 세기 동안 지구의 평균 기온은 0.5도 상승했으나, 남한은 1.0~1.5도, 북한은 1.9도, 개마고원 일대는 3.1도 정도 높아졌다(조성하와 채선숙, 2004). 기온이 따뜻해지면 식물의 개화 시기가 빨라지고, 난대성 식생의 분포대는 확장되지만 한대성 식생은 활기를 잃고 쇠퇴하는 등 생태적 부작용이 나타난다. 따라서, 이러한 북한의 기온 온난화 경향은 북부 내륙 고산대와 아고산대에 분포하는 극지·고산식물과 고산식물 등 한대성 식물들에 피해가 많이 발생할 것으로 예상된다(공우석, 2005). 산림 유실 또한 기후 시스템에 영향을 미치며, 이를 정량적으로 평가하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있는데(박윤영과 한정수, 2006), 북한 북부 고원지대는 대흥단군 감자밭과 같이 산림의 대규모 농지전환뿐만 아니라 비탈밭, 패기밭, 벌목 등으로 인한 산림유실이 일어나고 있는 것으로 보고되고 있다.

기후변화를 모니터링 함에 있어 식생지수는 중요한 역할을 할 수 있는데, 식생지수는 농작물, 초목, 산림 등과 같은 중요한 식생자원을 모니터링 하기 위해 설계된 도구로 장기간 동안의 기후 모델과 상호작용을 하는 생태 역학 모델의 개발을 지원할 수 있다(박윤영과 한정

수, 2006). 또한, 식생지수뿐만 아니라 식생지수를 통하여 도출된 메트릭스들은 식생자원 및 식생변화를 정량적으로 모니터링 하는데 주요 지표로 해석될 수 있다.

그러므로 광범위한 산림 유실이 일어나 있는 북한 황폐산지의 특성을 파악하기 위한 참조 자료로서 뿐만 아니라 기후 변화와 관련하여 일어날 한반도 아고산·고산 식생대의 변화에 대비하여 북한 북부 고원 지역의 산림 식생에 대한 정확한 이해가 필요하다. 또한, 향후 통일을 대비하여 전 국토의 자연환경보존계획을 수립함에 있어 북한의 산림 생태계 현황에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있어 북한과 같이 현장조사가 불가능한 지역은 원격탐사기법을 이용한 연구가 대안이 될 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 개마고원 및 백무고원을 포함하는 북부 고원지대를 분석하기 위해서 표고 1000m 이상의 아고산·고산 식생대를 대상으로 MODIS NDVI 자료를 이용하여 식생의 계절적인 변화를 모니터링하고 9년(2000~2008) 동안의 NDVI 시계열 변화특성을 조사 하였다. 특히, 계절적으로 다양하게 표출되는 NDVI 프로파일의 변화 및 NDVI 프로파일 값에서 도출된 메트릭스들이 식생의 계절별 특성과 어떤 설명력을 갖는지 분석하였다. 그리고, 동일한 수직적 산림 식생 환경을 가지고 있는 남한의 설악산과 지리산의 생물계절 특성과 비교하였다.

2. 연구 방법 및 자료

1) 연구대상지

개마고원과 백무고원으로 대표되는 북부 고원지대는 기후 및 지형적 조건으로 인하여 북한에서도 가장 개발이 어려운 지역으로 손꼽히고 있을 뿐만 아니라 밀집된 산림이 상당히 넓은 지역에 걸쳐 분포되어 있는 곳이다. 고원의 대부분은 산림인데 2003년 말부터 2004년 말까

지 북한 촬영 팀이 제작한 다큐멘터리를 통해(MBC, 2005) 원시림의 상태로 보존되고 있는 자연 생태계의 보고로 확인되었다.

북한지역의 연평균 기온은 3~10℃ 정도인데, 해발 고도가 높고 함경 산맥으로 인해 바다와 차단된 개마 고원 지역의 기온이 가장 낮으며, 남쪽과 해안으로 갈수록 기온은 높게 나타난다. 기온의 연교차는 매우 큰 편으로 개마 고원 일대에서는 40℃ 가까이 나타나며, 적은 곳에서도 30℃ 정도에 육박한다. 북한의 연강수량은 1,000mm 내외로, 풍향과 지형의 영향을 받아 지역마다 강수량이 다른데, 낭림 산맥과 함경 산맥의 바람 그늘에 해당하는 개마 고원 일대는 우리나라 최소우지로 산맥으로 둘러싸여 있어 바다로부터 습한 바람을 차단하기 때문에 600mm 정도로 매우 낮다(Edupia).

북한의 식생은 개마고원과 그 이외의 지역으로 나뉜다. 개마 고원 일대는 연평균 기온이 5℃에 미치지 못하는 지역으로 가문비나무 등의 냉대림이 자라고, 그 이외의 지역은 침엽수림과 활엽수림이 함께 자라는 혼합림

을 이룬다(Edupia). 북한의 북부 고원지대 산림은 수평적 구조로는 한대림, 수직적 구조로는 고산·아고산 식생이 주를 이루고 있다. 해발고도 800~1,000m부터 1,900~2,000m에 걸치는 북부고원지대(개마고원, 백무고원)는 아고산 침엽수림대로 소나무의 분포 한계이상부터 이깔나무의 분포 상한계선까지이다. 고산식물대는 해발고도 1,900~2,000m 이상으로 고산 초본, 고산 관목류가 자라며 일반적으로 이깔나무의 분포 상한계선 이상을 가리킨다. 해발고도 1,000m 일대가 수직적 분포의 하한계선인 한국 고유종 침엽수들은 과거 기후변화에 따라 한반도를 남북으로 이동하고 산 사면을 오르내리던 식물들이 국지적 환경에 적응하여 형성된 것으로 보인다(공우석, 2002).

개마고원은 우리나라에서 가장 높고 넓은 고원으로 북쪽의 압록강, 동쪽의 운흥강계곡, 남쪽의 함경산맥, 서쪽의 낭림산맥에 둘러싸여 있다. 지역에 따라 서부의 랑림군 일대를 랑림고원, 남서부의 장진군 일대를 장진고원, 부전군 일대를 부전고원이라 부르기도 한다. 산에

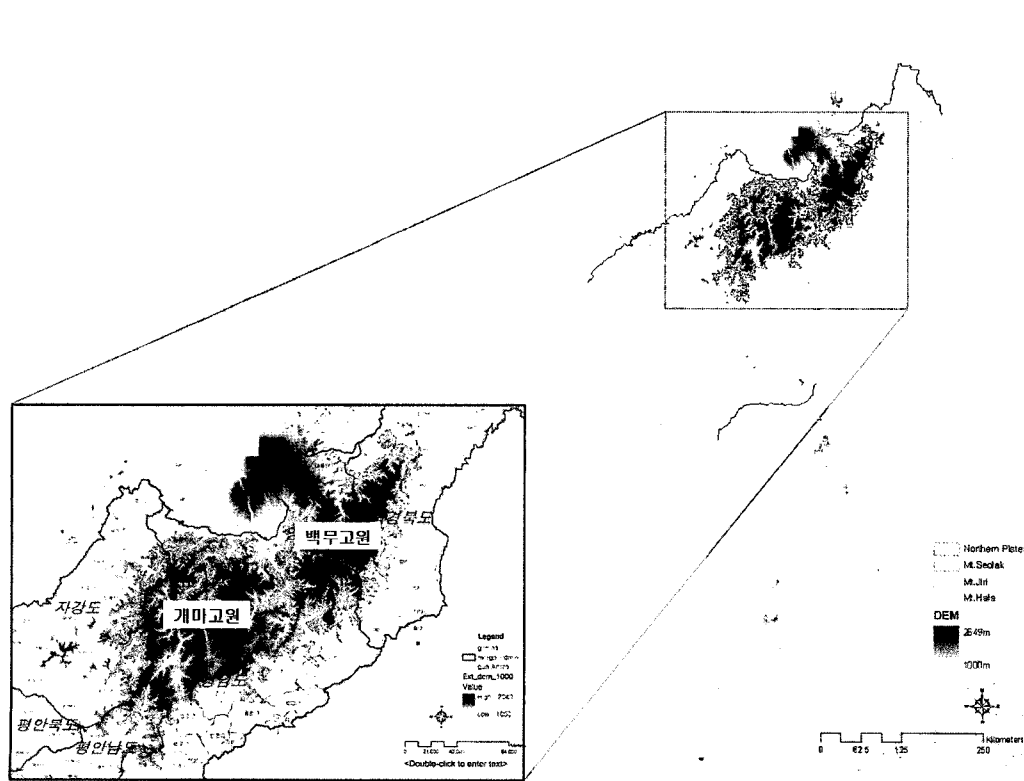


Fig. 1. Location of the Northern plateau region, North Korea.

는 참나무, 신갈나무, 사스래나무, 사시나무, 가래나무, 피나무, 소나무, 잎갈나무, 가문비나무, 잣나무 등이 분포하며, 해발고도 2,000m 이상 되는 곳에서는 눈잣나무, 눈측백, 만병초, 산진달래, 담자리꽃나무 등 고산식물이 자란다. 백무고원은 우리나라에서 개마고원 다음으로 넓은 고원으로 함경산맥, 동점령산맥, 우촌강, 오시천, 압록강과 두만강 상류에 둘러싸여 있다. 백두산의 화산폭발로 이루어진 서두수의 서쪽지역을 백두고원이라 하고, 동쪽 지역을 무산고원이라 한다. 대부분 산림지역으로 냉대 침엽수림, 냉대 침엽수와 활엽수의 혼합림, 고층습원식물, 고산식물 등이 분포한다. 식물분포의 수직대가 뚜렷하며 주요 수종은 잎갈나무와 소나무류이다. 분비나무, 가문비나무, 종비나무, 잣나무, 누운잣나무 등의 침엽수와 자작나무, 사스래나무, 황철나무, 피나무, 참나무, 마가목 등의 활엽수, 들쭉나무, 산진달래나무, 매저니나무, 만병초, 백산차, 곱향나무, 물싸리와 같은 관목, 곰취, 참취, 노루풀, 두메아편꽃, 가락풀, 백두산대황, 부채붓꽃, 각시석남 등의 초본식물들이 자란다(EnCyber).

북한의 북부 고원지대의 지리적 경계는 명확히 구분되어 있지 않지만 개마고원과 백무고원은 각각 면적 1만 4300km², 6520km², 평균해발고도 1340m, 1260m에 이르는 것으로 알려져 있다(EnCyber). 따라서 본 연구에서는 두 고원의 평균해발고도를 포함하면서 아고산·고산 식생대의 수직적 분포의 하한계선이 되는 표고 1000m를 기준으로 하여 연구 대상지 경계를 추출하였다. 지형공간자료는 USGS에서 제작된 3" DEM 데이터를 이용하였다. 구축된 수치 자료 상의 대상지의 공간적 범위는 39° 2' 38" ~ 42° 1' 34" N, 126° 9' 30" ~ 129° 6' 32" E으로 면적은 25,469km² 이고 문헌자료의 면적에 1.2배 정도이다. 이 지역은 북한 전체 면적의 약 20%를 차지하고 있으므로 면적으로 북한 지역에 남아 있는 양호한 산림식생을 분석하는데 충분히 대표성을 가지는 지역이라 할 수 있다.

2) MODIS 자료

MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 센서는 범 지구 환경모니터링(Earth Observing System: EOS) 프로그램의 일환으로 발사된 Terra(EOS AM) 위성과 Aqua(EOS PM) 위

성에 장착되어 있으며 총 36개의 분광밴드를 이용하여 육지, 해양, 대기에서 발생하는 지구환경에 대한 자료를 제공한다. 이중 1번 채널과 2번 채널은 공간해상도가 250m이며 1번 채널이 적색 파장대, 2번 영역이 적외선 파장대 이므로 두 채널을 이용하여 NDVI 영상을 얻을 수 있다. NASA의 EOS Data Gateway는 EOS 프로그램을 통해 수집한 위성영상자료의 DB를 구축하고 대기 보정 및 밴드별 연산을 통해 제작한 다양한 위성영상 자료(product)를 대기, 빙하, 육지, 대양, 자료보정 분야별로 제공하고 있다(www.eos.nasa.gov). 본 연구에서는 EOS Data Gateway 에서 제공하는 Terra MODIS Data Product 중 식생지수(MOD 13Q1) 자료를 활용하였다. 이 자료는 250m 공간해상도로 16일 간격으로 합성하여 매년 1월1일을 기준으로 16일 간격으로 제공된다.

MODIS 자료의 센서 궤도 중첩과 반복 관측 횟수를 고려하면 원칙적으로 16일 동안 최대 64번의 관측 데이터를 얻을 수 있다. 그러나, 구름과 실제 관측되는 범위 등의 제한으로 인해 16일 간격으로 중첩하기 위해 사용되는 자료의 수는 그보다 적다. MODIS 식생지수의 합성(Composite) 알고리즘은 세가지로 구성되는데 BRDF-C, CV-MVC, MVC 기법 등이 있다. 이들 기법은 수집된 MODIS 자료 중 구름의 영향이 적고 관측각도로 인한 왜곡이 심하지 않은 자료들을 선별하고 이러한 양호한 관측자료의 질과 개수에 기반하여 적용된다(Huete, *et. al.*, 2002). 더 자세한 MODIS 식생지수 합성 과정과 영상의 질에 대한 평가 자료(Quality Assessment Science Data Sets)는 NASA MODIS 웹사이트를 통해서 확인 할 수 있다(Huete, *et. al.*, 1999).

수집된 한반도 MODIS 자료는 Sinusoidal 투영체계에서 UTM Zone 52N 좌표체계로 변환하였으며 좌표변환에는 MODIS reprojection tool을 사용하였다. 본 연구에 사용된 16일 단위 MODIS 식생지수 데이터는 1년에 23개씩 9년 동안 총 207개의 파일이다. MODIS 자료의 공급이 2000년 2월부터 시작되었으므로 3개 자료(2000년 1월 1일, 17일, 2월 2일)와 원 데이터에 오류가 있어서 다운로드 되어지지 않는 4개 자료(2000년 3월 22일, 2004년 7월 28일, 2008년 7월 28일, 10월 16일)는 9년간의 평균값을 대치하여 처리하였다.

3) 식생지수(NDVI)

식생지수(VI: Vegetation Index)는 식물의 광합성량과 직접적인 상호관련성이 있기 때문에(Reed, *et al.*, 1994) 생태학적인 목적으로 이러한 지수들의 수많은 응용 가능성이 있다.

식생은 700mm 근처에서 명확한 흡수파장대와 반사파장대를 가지고 있으므로 그 반사율의 차이가 상당히 크다. 이러한 식생의 흡수 및 반사파장대에 착안하여 식생에 관한 원격탐사(Remote Sensing) 기법을 실행하기 위하여 많은 식생지수가 연구 되고 있다. 이처럼 각 파장대에 따른 반사특성에 기초를 두고 분광대 간의 특성을 조합하여 식생의 밀집도 등으로 구하는 식을 만드는 것이 가능하며, 이를 식생지수(Vegetation Index)라고 하고 식생지수는 식생의 활력도(Vegetation Activity)를 나타낸다. 일반적으로 식생에 의한 파장대별 반사율은 태양광선의 입사각과 위성의 촬영 각도에 의해 변하고, 대기 상태에 따라서도 관측되는 값이 다르므로 일반화에 의해서 이들의 영향을 어느 정도 감소시킬 수 있는데, 일반적으로 정규식생지수(NDVI, Normal Difference Vegetation Index)를 가장 많이 사용한다(Jensen, 2004).

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

NDVI는 식생의 광합성 활동 과정을 이용하여 식생마다의 녹음의 정도를 나타내 주는 일반적인 생물리학적 파라미터이다. 이것은 직접적으로 토지피복을 나타내는 것은 아니지만 시계열 NDVI값은 그들의 생물계

절학적 시그널에 기초하여 서로 다른 토지피복을 구분할 수 있다. 즉, 구름, 물, 눈 등과 같이 수분을 포함하는 경우에는 가시광선이 근적외선보다 반사 값이 크기 때문에 식생지수의 값이 음수가 되며, 암석, 마른 토양 등은 두 파장대에서 반사특성이 거의 같기 때문에 식생지수의 값은 0에 가깝게 나타난다. 녹색 식물인 경우에는 가시광선 영역의 반사율이 근적외선 영역보다 적으며, 따라서 식생지수의 값이 양수가 된다.

또한, 식생 군집, 식생 생체량, CO₂ 순환, 초식동물을 위한 양질의 먹이 제공, 다양한 생태계에서의 토지황폐화에 대한 시·공간적 분포에 대한 정보를 제공할 뿐만 아니라, 생태학자들이 식생분포, 생물계절, 생산량에서의 어떠한 변화가 이 상위 에너지 레벨에 영향을 미치는지를 다양한 스케일에서 정량화 할 수 있도록 해준다(Pettorelli, *et al.*, 2005).

4) 식생지수 시계열 프로파일 매트릭스 (NDVI temporal profile metrics)

영상을 분류하고 식생구조 및 변화(vegetation dynamics)를 설명하기 위해 토지피복의 생물계절특성을 알려주는 도구로서 시계열 NDVI 영상을 이용해왔고(Reed and Yang, 1997), 최근에는 NDVI 시계열 프로파일로부터 추출된 매트릭스를 이용하여 보다 정교한 식생변화 패턴을 분석하고 있다.

NDVI 시계열 프로파일로부터 추출된 매트릭스는 Pettorelli, *et al.*, (2005), Wang, *et al.*, (2004), Reed *et al.*, (1994) 등의 자료를 참고로 하여 아래 Table 1과

Table 1. Seasonal NDVI metrics and their phenological interpretation

Indices	Definition	Biological Meaning
Annual Maximum NDVI (년중 최고 NDVI 값)	Maximum value of the NDVI over a year	Annual production of vegetation
Timing of the annual maximum NDVI (년중 최고 NDVI 일)	Date when the maximum NDVI value occurs within a year	Timing of the maximum availability of vegetation
NDVI threshold (NDVI 임계값)	The NDVI value at time t which is the time of the greatest rate of change in NDVI between consecutive months t and $t + 1$	The greenness of the vegetation occurring at the onset of the growing season
Dates of the beginning or end of the growing season (생육 개시일, 종료일)	Dates estimated from threshold models or moving average procedures	Start and end of the green-up
Length of the 'green' season (생육기간의 길이)	Number of days between the estimated date of green-up and end of the growing season	In seasonal environments, number of days when food is available
Rate of increase/decrease of the NDVI (NDVI 증가기, 감소기)	Slope between two NDVI values at two defined dates, slopes of the fitted logistic curves to the NDVI time-series	Fastness of the greening up (spring) or the senescence (fall) phases

같이 정리할 수 있다.

NDVI 최대값(Annual Maximum NDVI)은 1년 중 NDVI 값이 최고치를 보이는 시기(Timing of the annual maximum NDVI)의 값이고, 그 해의 식생 활력도가 최대인 시점의 값을 나타낸다. NDVI 임계값(NDVI threshold)은 두 연속된 임의의 주기 t 와 $t+1$ 시기의 변화량이 가장 큰 값에 대응하는 t 시기의 NDVI 값으로 정의할 수 있다. NDVI 임계값은 NDVI 매트릭스를 작성하는 기준이 되는데, t 시기가 식생 생육이 시작되는 시점(Date of the beginning of the growing season)이다. 상록침엽수림의 배경에서 낙엽활엽수의 출현은 높은 NDVI 임계값을 가지고, 낙엽활엽수 및 상록침엽수로부터 침·활 혼효림을 구분하기 위해서 사용되기도 한다(Wang, 2004). 한 해 동안의 총 식생 성장 시기의 길이(Length of the 'green' season)는 식생 성장이 시작되는 시점인 NDVI 임계값 보다 높은 값이 연속하여 지속되는 기간으로 정의된다. 이 시기 동안 초식동물 등은 먹이를 획득할 수 있고 생태계가 영양분을 획득하는 기간이라 할 수 있다. 식생의 성장이 소멸되는 시기(Date of the end of the growing season)는 총 식생 성장시기의 길이가 끝나는 시점으로써 NDVI 임계값 보다 높은 값이 지속되는 기간이 끝나는 시점이다. 봄 시기의 NDVI 증가율(Rate of increase of the NDVI)은 식생 생장의 시작시점부터 최대 식생 생산량을 보이는 시점간의 기울기를 나타내고 가을 시기의 NDVI 감소율(Rate of decrease of the NDVI)은 NDVI 최대값부터 식생 성장시기가 끝나는 시점간의 기

울기를 나타내는데, 각각 Table 2의 Rate of greenup 과 Rate of senescence에 대응한다. 이것은 봄과 가을에 식생의 성장과 쇠퇴가 얼마만큼 빠른 속도로 일어났는지 알 수 있고 토지피복에 따라 2번 이상의 성장과 감소를 탐지할 수 있다.

5) NDVI 스무딩(NDVI smoothing)

시계열 NDVI 자료를 이용하여 토지피복을 모니터링함에 있어 엄격한 전처리 과정을 거치더라도 구름이나 대기산란, 양방향 효과 등에 의해 자료의 에러는 여전히 남아있다(Reed *et al.*, 1994). 시계열 NDVI 자료가 식생의 성장과 쇠퇴라는 연중 식생 사이클을 따른다고 가정했을 때 구름이나 열악한 대기 조건은 일반적으로 NDVI 값을 낮게 하는 경향이 있다(Chen *et al.*, 2004). 가장 많이 이용되는 MVC(Maximum Value Composite) 기법(Holben, 1986)도 데이터의 변이를 완전히 제거하지는 못하기 때문에 시계열 자료의 해석에 오류를 일으킬 수도 있다.

이러한 문제를 해결하고 더 정교한 시계열 NDVI 자료를 구축하기 위해 선행 연구들에서 MVC(Maximum Value Compositing), Curve-fitting, Step-wise logistic regression, BISE(Best Index Extraction method), Weighted least-squares linear regression 등의 스무딩 기법을 이용하고 있다(Pettorelli, *et al.*, 2005).

북한 북부 고원지역의 시계열 NDVI 자료는 기존 한반도 자료에서 자주 나타나는 여름철 구름에 의한 영향

Table 2. Phenological metrics from 2000 to 2008 in Northern plateau region, North Korea

	Beginning of growing season		Maximum greenness		Length of the 'green' season	End of growing season		Rate of greenup	Rate of Senescence
	Time	Value	Time	Value		Time	Value		
2000	5/9	0.48	7/28	0.87	176	11/1	0.48	0.08	0.07
2001	5/9	0.53	8/13	0.87	144	9/30	0.53	0.06	0.11
2002	4/23	0.46	7/28	0.86	160	9/30	0.48	0.07	0.10
2003	5/9	0.62	7/28	0.86	128	9/14	0.67	0.05	0.07
2004	5/9	0.52	7/28	0.86	144	9/30	0.56	0.07	0.08
2005	5/9	0.45	7/12	0.87	176	11/1	0.46	0.11	0.06
2006	5/9	0.47	7/28	0.86	160	10/16	0.47	0.08	0.08
2007	5/9	0.50	7/12	0.87	144	9/30	0.55	0.09	0.06
2008	5/9	0.53	7/28	0.86	144	9/30	0.62	0.07	0.06
Avg.	5/9	0.51	7/28	0.86	153	9/30	0.54	0.08	0.08

이 상대적으로 적게 나타나고 있어 추가적인 스무딩 방법을 적용하지는 않고 NDVI임계값을 이용하여 생물계절 특징을 추출하였다. 그러나, 북한 북부 고원식생과 동일한 수직적 산림 식생 환경을 가지고 있는 남한의 설악산 및 지리산의 표고 1000m 이상 지역의 연중 생물계절 주기 곡선을 비교분석 하기 위해서는 스무딩 기법을 적용하였다. 가장 간단하면서도 효과적인 Adjacent Average 기법, 스무딩되는 효과는 적지만 원 데이터의 값을 최대한 유지하면서 정교한 시계열 NDVI 값을 획득하는데 효과적인 Savitzky-Golay 방법, FFT(Fast Fourier Transform) 방법 등을 이용하여 세 지역의 변이를 관찰하였다. Adjacent Average 기법과 FFT 기법의 무빙 윈도우는 3 points를 적용하였고 Savitzky-Golay 기법 경우는 polynomial 6, 무빙 윈도우 4 points (Chen *et al.*, 2004)를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

북한 북부 고원지대 식생의 생물 계절주기를 분석한 결과는 아래 Table 2와 같다. 식생 성장기의 시작점인 NDVI 임계값은 9년 평균 0.51 이었고 시작 날짜는 5월 9일 이었다. 2002년에는 4월23일로 다른 해보다 한 주기(16일) 이른 시작을 나타내었다. 이 시기는 겨울부터 평년 보다 높은 값을 유지하면서 봄에 일찍 개서하였는데 식생 성장에 영향을 주는 다른 요인이 있었던 것으로 보인다.

한 해 동안의 총 식생 생육 기간은 2003년이 128일로 가장 짧았고 2001/2004/2007/2008년은 144일, 2000/2006년은 160일, 2000/2005년은 176일 동안 지속되었다. 식생성장이 끝나는 시점은 2000/2005년을 제외하고는 9월 말경이면 식물의 잎이 상당히 쇠락하였다. 식생의 활력도가 가장 높은 시기는 7월 28일을 전후로 한 기간으로 9년 평균 NDVI값이 0.86으로 나타나 이 시기에 산림의 광합성량이 최고점에 도달하였다. 신엽이 나오는 시점부터 최대값까지의 기울기와 식생 성장이 끝나는 시점까지의 기울기로 표현할 수 있는 식생의 성장률과 쇠락률은 0.08의 기울기로 동일하였지만 시작하는 시점 보다 끝나는 시점의 식생 활력도가 0.03 정도 높게 나타났다.

또한, 한반도 지역의 2000년부터 2008년까지의 아고산·고산 식생의 평균 NDVI 값의 분포 곡선은 Fig. 2와 같다. 북한 북부 고원지역은 최소 0.2에서 최대 0.9로 계절적 변화는 식생의 생물 계절 특성에 맞게 정규곡선을 그리고 있는 가운데 1월부터 4월까지 낮은 값을 보이다가 5월에 급격히 성장하고 9월말에 다시 급격히 쇠퇴한 후 12월부터 3월까지 0.3 정도로 유지하고 있는 것으로 관찰된다.

5월 초순의 급격한 성장 이후 6월부터 8월까지 NDVI값은 모두 0.8 이상으로 나타나 북한의 고원지역 일대 산림은 6월에서 8월까지 계속적으로 식생이 활발한 상태를 유지하고 있었다. 이것은 또한 남한의 경우에 발생하는 여름철에 발생하는 장마의 영향도 상대적으로 북한에서는 적게 받고 있는 것으로 보이는데, 이것은 개마고원 일대가 함경, 낭림 산맥으로 둘러싸여 격해도가 커서 이동성 저기압의 영향을 적게 받기 때문으로 분석

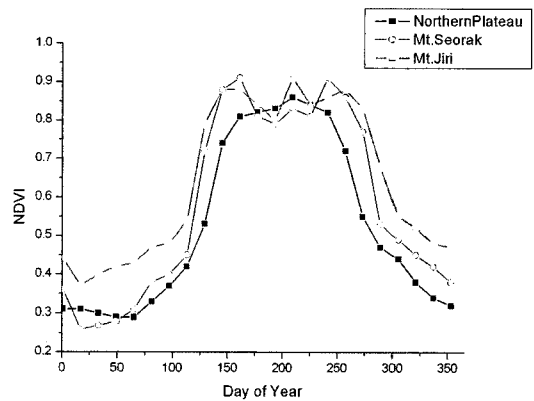


Fig. 2. Comparison of average NDVI (2000~2008) between North Korea (Northern Plateau) and South Korea (Mt. Seorak & Mt. Jiri).

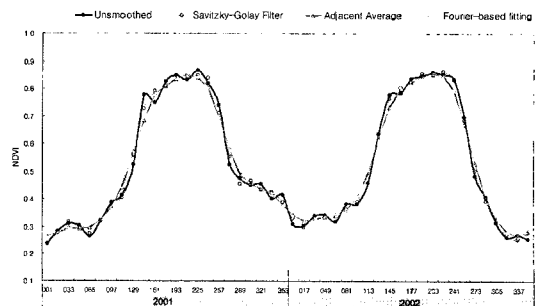


Fig. 3. Comparison of the different smoothing methods for Northern plateau region, North Korea.

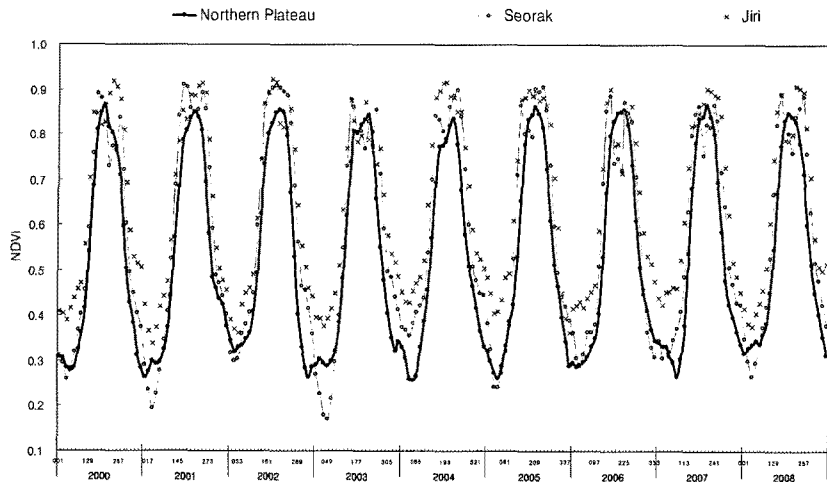


Fig. 4. Comparison of NDVI profiles smoothed with moving average curves during 9-years (2000~2008): Northern plateau region of North Korea, Mt. Seorak and Mt. Jiri of South Korea.

Table 3. Phenological metrics over 3 different regions

		Beginning of growing season		Length of the 'green' season	End of growing season	
		Time	Value		Time	Value
North Korea	Northern plateau	4/23~5/9	0.51	153	9/14~11/1	0.54
South Korea	Mt. Seorak	4/23~5/9	0.45	192	10/16~12/3	0.50
	Mt. Jiri	4/23	0.55	197	10/16~12/19	0.61

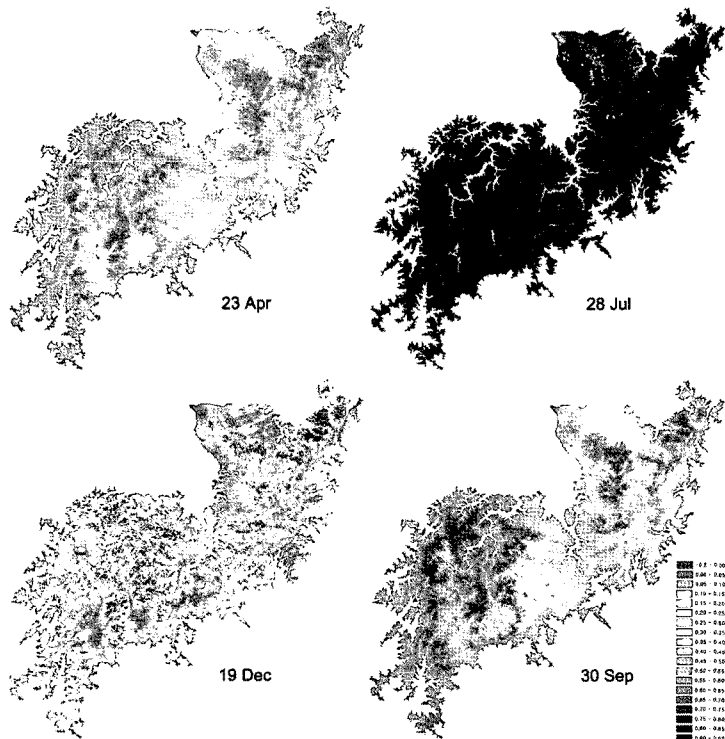


Fig. 5. The map of phenological dynamics in 2002 for Northern plateau region, North Korea.

할 수 있다.

북한 북부 고원지역의 시계열 NDVI 자료는 기존 한반도 자료에서 자주 나타나는 여름철 구름에 의한 영향이 남한 지역에 비해 상대적으로 적게 나타나고 있지만 남아있는 자료의 변이를 제거하고 시계열 식생 생육 주기 곡선을 파악하기 위해 스무딩을 실시한 결과는 Fig. 3과 같다. Savitzky-Golay 기법은 원 자료를 충실히 따라가면서도 여름철과 겨울철의 데이터 변이를 완화해 주고 있었고 Adjacent Average 기법과 Fourier-base fitting 기법은 좀 더 부드러운 곡선을 만들어 주는 것을 확인 할 수 있었다.

아래 Fig. 3은 한반도에서 북한의 북부 고원지대와 비슷한 아고산·고산 식생 구조를 가지고 있는 표고 1000m 이상의 설악산(37°N 128°E), 지리산(35°N 127°E) 지역을 본 연구 대상지와 비교한 결과이다. 전반적인 생물 계절 특성을 파악하기 위해 각 지역별로 인접 값 평균(Adjacent Average) 스무딩 기법을 이용한 NDVI 시계열 곡선을 나타내었다.

식생의 급격한 성장률과 쇠락율은 북부 고원지역과 설악산 및 지리산 지역에 있어서 큰 차이를 보이지 않았지만 총 생장기간은 북한 아고산·고산 식생대의 생육 기간이 약 한달 이상 짧은 것으로 분석되었다(Table 3). 북한 북부 고원지역은 2002년을 제외하고는 모두 5월 9일에 개서하기 시작했고 설악산 지역은 2000, 2007년을 제외하고는 모두 4월 23일 개서하였다. 지리산도 4월 23일에 개서하였다.

성장률과 쇠락률의 경우 북부 고원 지역이 비교한 지역들 중 가장 경사가 급하게 증가했다 감소하였고 지리산 지역에서는 2번에 걸쳐 나누어져서 성장과 쇠락을 하고 있는 것으로 보여 주고 있다.

스무딩 기법을 이용하여도 여름철 구름의 영향이 남한지역의 아고산·고산 식생대에는 남아있는데 반해 북한의 북부 고원지역은 상대적으로 여름철의 최고값에 구름에 의한 잡음이 적은 것으로 나타났다. 설악산과 지리산 지역의 최대 식생 생산량은 0.91로 북한 북부 고원 지역보다 0.04 더 높았다. 지리산 지역의 경우 특히 겨울철에도 NDVI 값이 0.4를 전후한 수준으로 유지되고 있었다. 이러한 현상은 지리산 지역의 조릿대로 인한 것으로 분석된다.

4계절의 변화가 뚜렷한 한반도의 기후특성을 반영하

듯 Fig. 5는 NDVI 값의 변화에 따른 생물계절 특징을 분명하게 보여주고 있다. Fig. 5는 2002년도의 북부 고원지대 식생의 NDVI의 생물계절 특징에 따라 NDVI 임계값이 시작되는 봄, 최대 식생 활력도를 보이는 여름, 식생성장시기의 끝인 가을, 최소 NDVI값을 보이는 겨울 시기별로 공간적 분포를 나타내었다. 겨울 시기(12월 19일)는 북부 고원지역의 고산 침엽수림과 낙엽수림의 분포를 구분 하고 있고 여름(7월 28일) 시기는 표고 1000m 이상 되는 곳에 위치한 하천과 호수 주변의 계곡 부에 발달한 마을을 중심으로 식생이 훼손되고 있는 것을 확인할 수 있다. 백무고원 지역의 백두산 동남쪽과 삼지연, 대홍단군 일대의 감자밭 지역도 주변의 산림 식생보다 낮은 NDVI 값을 보여주고 있다. 다른 해와는 달리 2002년도에는 봄(4월 23일)시기가 일찍 시작되었는데 봄과 가을시기(9월 30일)는 낙엽수를 중심으로 성장과 쇠락의 시간이 점차적으로 진행되고 있는 모습을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 개마고원 및 백무고원 지역을 포함하는 북한 북부 고원 지역의 아고산·고산 식생의 생물계절 특성을 시계열 MODIS 영상에서 나타나는 식생지수(NDVI) 프로파일과 이로부터 추출된 메트릭스(Metrics)를 이용하여 생물계절 특징을 정량적으로 분석하였다.

9년(2000~2008) 동안의 평균적인 NDVI값의 분포는 최소 0.29에서 최대 0.86 이었고 5월 초순의 급격한 성장 이후 6월부터 8월까지 NDVI값이 모두 0.8이상 지속적으로 유지되었다. 식생이 급격히 성장하기 시작하는 시점과 쇠퇴하는 기울기는 0.08로 동일하였으나 그 시기는 9년 평균 각각 5월 9일, 9월 30일 이었고 이때 NDVI 값은 각각 0.51 0.54이었다. 이것은 표고 1000m 이상 되는 북한 고원지역의 산림식생은 비교적 비슷한 성장 시기를 가지는 수종들로 이루어져 이들 식생들의 성장과 쇠퇴가 동시에 급격히 진행되는 것으로, 새잎이 돌아나는 시기와는 달리 낙엽이 떨어지는 시기에 좀 더 오랫동안 식생 활력을 유지하고 있었다.

특히 북부 고원지역은 데이터 스무딩 작업이 필요 없

을 정도로 정규곡선형태를 그리고 있는데, 이것은 설악산이나 지리산 지역보다는 넓은 면적에 걸쳐 있어 이미 자료의 정규화가 이루어졌고, 남한에 비해 상대적으로 여름철 장마의 영향을 덜 받기 때문에 NDVI 프로파일의 값에 영향을 미치지 못했기 때문이다.

식생의 생물 계절 특성을 반영하는 NDVI 그래프 곡선의 평균적인 생육주기도 평균 153일 정도로 일정하게 유지되면서 식생주기 그래프의 곡선이 비슷한 형태로 반복되고 있었다. 이러한 결과는 북한 북부 고원지역 일대의 아고산·고산 식생은 아직까지 대규모 훼손이 일어난 나지 형태가 넓게 확산되지 않은 원시림의 형태를 보존하고 있는 것으로 보인다. 남북한의 아고산·고산 식생대는 약 30일 이상의 식생 생육 기간의 차이가 있었고 남한지역이 MODIS 자료의 합성 주기인 16일만큼 개서시기가 빨랐다.

2002년의 NDVI 분포 곡선이 겨울부터 평년 보다 높은 값을 유지하면서 봄에 일찍 개서하였는데 이것은 그 시기에 식생 성장에 영향을 주는 다른 요인이 있었던 것으로 추정된다. 향후 기상요소나 인간의 간섭에 의한 토지피복 변화 등과의 연관성 분석이 요구된다.

본 연구에서는 위성자료를 통한 NDVI 프로파일 값 및 NDVI 프로파일에서 도출된 매트릭스만을 사용하여 연구함으로써 연구의 신뢰도를 높이는 부분이 부족하였다는 한계점을 가지고 있지만, 북한의 고산·아고산 식생의 생물계절 변화를 시계열로 정량적으로 분석한 연구로서 그 의의가 클 뿐만 아니라 북한의 산림식생현황 파악을 통한 산림 식생 라이브러리 작성 및 통일을 대비한 북한 자연환경계획 수립에 기초 베이스 맵으로 활용될 수 있다.

시간 해상도가 모디스 영상의 16일 합성 주기로 되어 있어서 온도에 따라 일단위로 변화하는 식생의 성장 시작 시점을 정확하게 찾아내는 것에는 한계가 있었지만 본 연구 결과를 바탕으로 향후 보다 더 정교한 분석이 가능하다. 최근 연구(허용 외, 2007; 염종민 외, 2005)들을 통하여 MODIS 자료의 개선이 이루어지고 있으나 구름의 영향으로 인한 정확한 육상 생태계의 생물리학적 모델 적용에 한계가 있는 만큼 향후 QA(Quality Assurance) 자료 등을 참고로 하여 NDVI 임계값의 차이를 픽셀 신뢰도(reliability)나 연구지역의 강우량과 비교함으로써 구름의 영향으로 인한 과소추정인지 기상

학적 요인으로 인한 생육부진인지 등에 대한 판단에 도움이 될 수 있다. 또한, 아고산과 고산지역으로 분리하여 생물 계절 특성을 분석한다면 보다 정교한 자료를 구축할 수 있을 것이다.

식생의 변화는 단기간에 빠르게 변화하는 것이 아니라 수십 년에 걸쳐 장기적으로 변화하는 것이다. 그렇기에 9년간의 연구 자료로는 장기적인 변화를 감지하는데 한계가 있었다. 이러한 문제는 지속적인 연구 관찰을 통하여 해결될 것이며, 본 연구 결과와 같은 식생지수를 이용한 생물계절 특징을 분석한 기초자료는 북한 관련 문제뿐만 아니라 향후 기후변화와 관련된 문제에서도 크게 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 대림대학 선진사회연구원의 연구비 지원에 의해서 수행되었습니다(선진사회연구원 2008-7).

참고문헌

공우석, 2002. 북한 자연생태계의 생물지리적 특성, 환경영향평가, 11(3): 157-172.

공우석, 2005. 지구온난화에 취약한 지표식물 선정, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 41: 263-273.

박운영 과 한경수, 2006. SPOT/VEGETATION NDVI 자료를 이용한 동북아시아의 생태기후지도, 한국농림기상학회지, 8(2): 86-96.

박정술, 김경탁, 이진희, 이규성, 2006. 봄 가뭄 평가를 위한 다중시기 MODIS 영상의 적용성 분석, 한국지리정보학회지, 9(4): 176-192.

염종민, 한경수, 김영섭, 2005. 한반도 식생에 대한 MODIS 250m 자료의 BRDF 효과에 대한 반사도 정규화, 대한원격탐사학회지, 21(6): 445-456.

염종민, 한경수, 이창석, 박운영, 김영섭, 2008. SPOT/VEGETATION NDVI 자료를 이용한 북한지역 식생 변화 탐지, 한국지리정보학회지,

- 11(2): 28-37.
- 조성하 와 채선숙, 2004. 우리나라 기후의 온난화와 대기 순환배경, 기상과 수문, 345, 13-16.
- 최삼규, 2006. 한반도의 지붕 개마고원을 가다, 웅진미디어.
- 허용, 변영기, 김용일, 유기윤, 2007. HANTS 알고리즘을 이용한 MODIS NDVI 시계열 영상의 구름화소 문제 해결에 관한 연구, 한국GIS학회 2007공동춘계학술대회 논문집, 169-174.
- MBC, 2005, 개마고원, MBC 특집 다큐멘터리.
<http://www.encyber.com/>
<http://newdle.edupia.com/>
- Cha, S. and C. Park, 2007. The Utilization of Google Earth Images as Reference Data for the Multitemporal Land Cover Classification with MODIS Data of North Korea, *Korean Journal of Remote Sensing*, 23(5): 483-491.
- Chen, J., P. J nsson, M. Tamura, Z. Gu, B. Matsushita, and L. Eklundh, 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky Golay filter, *Remote Sensing of Environment*, 91(3-4): 332-344.
- Holben, B., 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, 7(11): 1417-1434.
- Huete, A., K. Didan, T. Miura, E. Rodriguez, X. Gao, and L. Ferreira, 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 195-213.
- Huete A., C. Justice, and W. Leeuwen, 1999. MODIS Vegetation Index (MOD 13): Algorithm Theoretical Basis Document (version 3), pp. 26-29.
- Jensen, John R., 2004. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, 3rd Edition, Prentice Hall.
- Pettorelli, N., J. Vik, A. Mysterud, J. Gaillard, C. Tucker, and N. Stenseth, 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change, *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9): 503-510.
- Reed, B., J. Brown, D. VanderZee, T. Loveland, J. Merchant, and D. Ohlen, 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery, *Journal of Vegetation Science*, 703-714.
- Reed, B. and L. Yang, 1997. Seasonal vegetation characteristics of the United States, *Geocarto International*, 12(2): 65-71.
- Wang, Q. and J. D. Tenhunen, 2004. Vegetation mapping with multitemporal NDVI in North Eastern China Transect (NECT), *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(1): 17-31.