

MODIS LAI (엽면적지수) Product의 활용성 평가*

하 립¹·신형진²·박근애³·홍우용⁴·김성준^{5**}

The Evaluation of Application to MODIS LAI (Leaf Area Index) Product*

Rim HA¹· Hyung-Jin SHIN²· Geun-Ae PARK³· Woo-Yong HONG⁴
Seong-Joon KIM^{5**}

요 약

엽면적 지수(LAI)는 지표 환경에 영향을 미치는 광합성, 증발, 그리고 에너지 균형과 같은 생물 물리학적 변화 과정에 있어 매우 중요한 인자이며, 여러 가지 생태학적 모델의 입력 자료로서도 필수적이다. 이러한 중요성에 근거하여 더욱 정확하고 유용한 LAI 추정 기법의 개발이 요구되지만, 현실적으로 LAI는 광역적 실측이 어렵기 때문에 대부분 LAI 연구에서는 정규화식생지수(NDVI)와의 단순 관계식을 통해 추정되어져 왔다. 본 연구에서는 경안천 유역(561.12 km²)을 대상으로 MODIS LAI Product의 활용성을 평가하고자 NOAA AVHRR NDVI와의 관계식으로 추정된 LAI와 국립산림과학원의 실측 LAI (2003, 2004)를 MODIS LAI와 비교 분석하였다. 그 결과 MODIS LAI는 활엽수림에서는 실측치보다 약 14% 높게, NOAA LAI보다 약 15~30% 높게 추정되었다. 침엽수림에서는 2003년 실측치가 약 5% 높게 추정되었으며, NOAA는 4월을 제외하고 약 7%의 차이를 보였다. 이러한 결과는 일부 지점에서 이루어지는 실측과 MODIS LAI 추출 시 기준 자료가 포함하는 공간해상도의 한계 및 토지피복분류의 부정확성 등으로부터 발생한다. 따라서 실측자료에 근거한 MODIS자료의 보정기술을 향상시킴으로써 향후 광역적인 식생정보 제공 및 물수지 모의를 위한 생태학 및 수문학적 모형의 입력자료 등으로의 활용범위가 더욱 확대 가능할 것이다.

주요어 : 엽면적지수(LAI), MODIS, NOAA

Abstract

Leaf area index (LAI) is a key biophysical variable influencing land surface processes such as photosynthesis, transpiration and energy balance, and is a required input to estimate evapotranspiration in various ecological and hydrological models. The development of more correct

2008년 3월 24일 접수 Received on March 27, 2008 / 2008년 4월 29일 수정 Revised on April 29, 2008 / 2008년 5월 14일 심사완료 Accepted on May 14, 2008

* 본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 1-9-3)에 의해 수행되었습니다.

1 건국대학교 일반대학원 사회환경시스템공학과 석사과정 Dept. of Civil and Env. System Eng. Konkuk University

2 건국대학교 일반대학원 사회환경시스템공학과 박사수료 Dept. of Civil and Env. System Eng. Konkuk University

3 건국대학교 일반대학원 지역건설환경공학과 박사수료 Dept. of Rural Eng. Konkuk University

4 건국대학교 일반대학원 사회환경시스템공학과 석사과정 Dept. of Civil and Env. System Eng. Konkuk University

5 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 Professor, Dept. of Civil and Env. System Eng. Konkuk University

** 연락처 E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr

and useful LAIs estimation techniques is required by these importance, but LAIs had been assumed in most LAI research through simple relations with the normalized difference vegetation index (NDVI) because the field measurement is difficult on wide area. This paper is to evaluate the MODIS LAI Product's practical use by comparing with LAIs that is derived from NOAA AVHRR NDVIs and the 2 years (2003-2004) measured LAIs of Korea Forest Research Institute in Gyeonggancheon watershed (561.12 km²). As a result, the MODIS LAIs of deciduous forests showed higher values about 14 % and 15~30 % than the measured LAIs and NOAA LAIs. In the year of 2003, the MODIS LAIs in coniferous forests were 5 % higher than the measured LAIs, and showed about 7 % differences comparing with the NOAA LAIs except April. These differences come from the insufficient field data measured in partial points of the target area, and the extracted reference data from MODIS LAIs include the limits of spatial resolution and the error of incorrect land cover classification. Thus, using the MODIS data by the proper correction with the measured data can be useful as an input data for ecological and hydrological models which offers the vegetation information and simulates the water balance of a given watershed.

KEYWORDS : Leaf Area Index (LAI), MODIS, NOAA

서론

최근 지구 온난화 현상과 더불어 급격한 기후 변화가 진행됨에 따라 온도, 강수, 운량 및 복사량 등 수문기상뿐만 아니라 식생분포, 토지피복상황 등이 크게 변화되고 있으며, 이는 수문순환과정과 관련하여 미래 수자원분야에 까지 많은 영향을 줄 것이다. 수문순환 과정에서 강수에 이은 유출 및 증발산량은 현재 물 부족 국가에 속하는 우리나라의 수자원 관리에 있어 큰 영향력을 가지는 요소로서, 지형 및 기후학적 영향을 가장 많이 받고 있다. 따라서 일차적으로 기후학적 영향을 비롯한 지형적 특성을 분석함에 있어 지표의 70%를 차지하는 식생 관련 연구는 필수적이다. 지금까지 식생의 활력도 및 특징을 표현하는 NDVI와 LAI 등과 같은 식생지수를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 식생을 대표하는 지수들은 우리나라 국토의 대부분이 산림지역이며, 강수의 약 60%가 증발산 되는 것을 감안할 때 생태학적 에너지와 이산화탄소 유동량 추정 등에도 매우 유용한 인자라고 할 수 있다.

또한 강수의 일차차단과 증발산에 직접 관

여하는 인자로, 수문순환 모델링과정에 있어 LAI와 같은 식생지수의 역할은 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 대부분의 수문모델에서는 LAI값을 경험에 의한 단일 값으로 처리하거나, NDVI와의 단순 관계식을 이용하여 추정된 값을 사용, 때로는 대기 보정을 거치지 않은 상태로 부정확하게 추출된 NDVI를 이용하여 수종 구분 없이 무분별하게 추정하여 사용하기도 한다. 그러나, 현실적으로 LAI를 실측하는 것은 한계가 있으며, 넓은 연구 대상 지역에 대한 정보를 수집하기에는 많은 어려움이 따른다.

이에 원격탐사 기술을 활용하면 광범위 지역에 대한 시계열 정보를 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서, 일반 사용자에게 무료로 제공되고 있는 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer) 센서에서 얻어진 영상을 이용하여 추출된 LAI는 적절한 검증작업을 거친 후 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

위성영상을 이용하여 LAI를 추정하는 연구 사례를 살펴보면, 국내의 경우 김선화(2003), 김지연(2004), 박지훈(2005)과 장기창(2005) 등

은 Landsat ETM+ 위성영상의 분광정보를 이용하여 NDVI와의 경험적 관계식을 바탕으로 추정된 LAI와 실측한 LAI를 MODIS LAI와 비교하여 검증 및 분석한 결과를 제시하였으며, 박종화 등(2005)은 NOAA 위성영상을 이용하여 추출한 NDVI와 실측 LAI와의 상관관계를 이용하여 LAI를 추정하였다. 또한 김주훈(2005) 등은 Landsat ETM+ 위성영상에서 추출한 NDVI와 실측 LAI와의 경험적 관계식을 이용하여 LAI를 추정한 연구를 발표하였다.

국외의 경우, Myneni과 Williams 등(1994)이 3차원 복사전달모델을 이용하여 NDVI와 fPAR간의 관계식을 도출하였으며, fPAR을 이용하여 LAI를 추정하였고, Yin 등(1997)은 상대성장측정식을 이용하여 현지 측정 LAI와 그 지점에서의 NDVI와의 상관관계를 이용하여 광역적인 LAI를 추정하였다. 이후 Sandholts 등(1999)은 수문모델인 MIKE-SHE 모형의 입

력인자로 사용되는 LAI의 추정을 위하여 Myneni과 Williams 등(1994)이 제안한 식을 사용하였다. Andersen 등(2002)은 NOAA NDVI와 fPAR을 통한 경험적 식을 이용하여 LAI를 추정하였다. 또한 Gowda 등(2007)은 현지 측정 LAI와 Landsat TM 영상에서 추출된 SVI와의 상관관계를 이용하여 LAI를 추정하였고, Jan Pisek 등(2007)은 SPOT 영상 VEGETATION 센서를 통해 LAI를 추정하였으며, MODIS LAI와 Landsat ETM+ LAI 영상을 각각 비교 분석한 후 도출된 상관관계를 이용하여 LAI의 합성 결과값을 얻어내는 연구를 발표한 바 있다 (표 1, 2).

이처럼 LAI 추정을 위해 많은 기법들이 사용되어 왔으며, 현재 지속적으로 보다 정확한 LAI 추정을 위한 노력이 요구되어지고 있다.

표 1. LAI 추정 기법 연구사례(국외)

저자(연도)	연구대상지역	LAI 추출 자료	LAI 추정 기법
Andersen 등(2002)	Senegal River Basin 내의 3개 소유역	NOAA	NOAA AVHRR NDVI와 FAPAR과의 관계식 및 FAPAR과 LAI의 관계식을 이용하여 최종 LAI 산출
Yingxin 등(2006)	China	MODIS LAI	MODIS LAI 자료를 이용하여 최적의 방법으로 보간
Suleiman 등(2007)	Jordan Univ. Alfalfa field	MODIS	AVHRR 영상의 알베도와 LAI를 이용하여 제작된 MODIS 1 km 해상도 8 Day 합성 LAI 자료 이용
Gowda 등(2007)	Texas Panhandle	Landsat ETM+ 현지측정	Landsat TM 영상에서 추출된 SVI (Spectral vegetation index)와 실측 LAI와의 관계식을 이용한 LAI 추정
Tang 등(2007)	Changbaishan Nature Reserve, China	MODIS	MODIS BRDF/Albedo 영상으로부터 관계식을 이용하여 추출된 NDVI와 LAI 산출
Jan Pisek 등(2007)	AGRO, HARV, KONZ, NOBS	SPOT Landsat ETM+ MODIS	SPOT 영상 VEGETATION 센서에 의해 추출된 LAI, MODIS LAI, Landsat ETM+ LAI 영상을 이용한 BigFoot database를 분석하여 상관관계 이용 합성 결과값 분석

표 2. LAI 추정 기법 연구사례(국내)

저자(연도)	연구대상지역	LAI 추출 자료	LAI 추정 기법
김선화(2003), 박지훈(2005)	광릉수목원 내 시험림	MODIS LAI Landsat ETM+ 현지 측정	Landsat 영상의 분광정보와 실측 LAI의 수종별 다중회귀분석을 통해 제작된 기준 엽면적 지수와 MODIS LAI자료 비교
김지연(2004)	광릉 수목원	MODIS LAI Landsat ETM+ 현지 측정	Landsat NDVI를 이용하여 추정된 LAI, 실측 LAI와 MODIS LAI 비교
장기창(2005)	광릉수목원 내 시험림	NOAA NDVI Landsat ETM+	Pierce(1993)의 식과 INTEP 프로젝트 결과 추정된 LAI와 Landsat 영상의 분광정보와 실측 LAI의 수종별 다중회귀분석을 통해 제작된 기준 엽면적 지수 비교
박종화 등(2005)	한반도 전역	NOAA NDVI	NOAA AVHRR NDVI 값과 LAI와의 상관관계식을 이용한 LAI 산출
김광섭 등(2005)	한반도 전역	NOAA NDVI	NOAA-AVHRR 자료를 사용하여 보스턴대학(Climata Vegetation Research Group)에서 생산한 LAI 사용
김주훈 등(2005)	경안천 유역	Landsat ETM+	Landsat NDVI와 실측 LAI와의 관계식을 이용한 LAI 추정



그림 1. 연구 진행 순서도

본 연구에서는 앞서 언급 한 바와 같이 자료 수집이 용이하고 사용자들이 다루기 쉬운 LAI 자료의 활용성을 평가하고자 Terra MODIS 위성영상을 통해 제작 된 LAI Product를 수집하여 경안천 유역을 대상으로 분석하였다. MODIS LAI는 1 km의 낮은 공간해상도와 정확성에 대한 보정이 요구되고 있다. 하지만, LAI의 실측과 시계열적 공간추정이 어려운 현실을 고려할 때, 많은 연구를 기초로 하여 무료로 제공되고 있는 8일 주기의 MODIS 자료는 각 분야에 보다 실용적이고 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

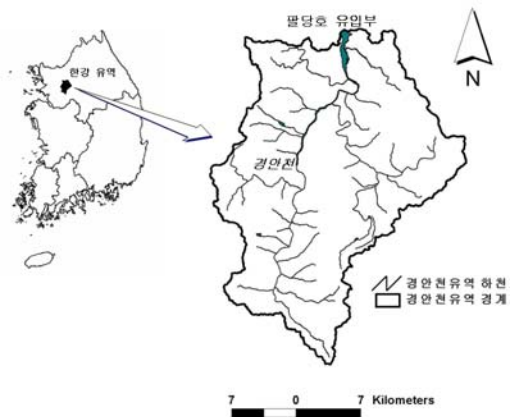


그림 2. 연구대상지역-경안천 유역

1. 연구 내용

본 연구에서는 MODIS LAI자료의 검증을 위한 비교 자료로 인하대학교 원격탐사연구실에서 인천 계양산을 대상으로 측정한 실측 LAI 값을 사용하였다. 언급된 자료는 경안천

표 3. 위성영상 자료 속성 및 사용 기간

위성	산출물	공간해상도	주기	기간
NOAA	NDVI	1.1km	Month	2003년 ~ 2004년 (01월 ~ 12월)
MODIS	[MOD13]NDVI	250m	16-Day	
	[MOD15]LAI	1km	8-Day	

유역 MODIS NPP 검증을 위하여 사용된 실측 LAI로써, 국립산림과학원(2007)과 박지훈(2005)이 연구 발표한 보고서 및 논문 내용에 제시된 바 있다. 이를 참고하여, 구축된 NOAA NDVI 및 MODIS NDVI를 LAI와의 관계식을 통해 추정 후 비교 분석하였다.

본 연구의 내용 및 분석절차는 순서도는 그림 1과 같다. 연구를 위해 구축된 저해상도 위성영상의 속성은 다음 표3과 같으며, NOAA는 기상청자료를 제공받았으며, MODIS는 Earth Observing System Data Gateway (EOS Data Gateway; <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/index.html>)에서 무료로 제공하는 산출물을 다운받았다. 2000년도를 기준으로 NOAA 위성은 과거자료 구축이 가능하며, MODIS는 2000대 이후 영상을 제공받을 수 있다.

2. 연구대상지역

LAI의 추출 및 검증을 위해 그림 2에서 보이는 바와 같이 동경 127°, 북위 37°에 위치한 경기도 광주군 일원의 경안천 유역을 연구대상지역으로 하였으며, 유역 면적은 약 561.14 km², 유역 평균 표고는 180.81 m, 유역 평균 경사는 27.01 %, 유로 연장은 47.38 km에 달한다. 특히 산림이 65%를 차지하고 그 외 여러 토지피복항목이 고루 분포하고 있어, 식생정보 추출 연구에 적절한 지역으로 판단되어 연구대상지역으로 선정하였다.

3. LAI 추정

3.1 LAI

LAI는 NDVI와 함께 식생정보를 대표적으로

제공하는 지표이며, 단위 지표 면적당(m²) 수목이 지니고 있는 전체 잎의 면적(m²)에 대한 비율을 지수로 나타낸 것으로 엽면적지수 1은 1m² 지상면적에 1m²의 엽면적이 존재함을 의미한다. 이러한 LAI는 식물의 엽층에서 발생하는 에너지, 이산화탄소, 질소의 교환과 식물의 구조적 특징을 나타내는 중요한 지수로서 환경생태나 기상 및 수문분야에서 다양하게 활용되고 있다. 일반적으로 전 세계의 LAI 값은 0에서 8까지의 범위를 가지며, 국립산림과학원에서 발표한 2007년 연구 보고서 “극다중분광 영상자료의 산림정보해석 및 활용기법 개발”에 따르면 LAI는 식생의 성장과 토양의 질소함유량과는 반비례관계를 보인다고 하였다. 또한, 생태계에서의 물 흐름과 관계하여 유출량과는 반비례관계를 보이나, 증발산과는 비례관계를 보인다고 하였다. 즉, LAI 수치가 높다는 것은 생태계의 물 순환현상과 관계하여 여름시기에 잎에서 발생하는 식생의 증발산 활동이 활발하다는 것을 의미하며, LAI가 높은 시기에는 토양의 질소함유량이 가장 낮음을 의미한다.

본 연구에서는 엽면적지수(LAI)를 위성영상으로부터 추정하기 위하여 MODIS와 NOAA 위성영상을 사용하였으며, MODIS LAI Product의 경우 일반적으로 수학적 모델링을 통해 LAI를 계산하는 방법을 채택하고 있으며, 대기의 영향을 받아 수학적 모델링의 적용이 불가능한 경우에는 백업 알고리즘으로 영상의 NDVI와 LAI와의 관계식을 구해서 이용하는 방법을 적용한다.

3.2. 토지피복도

경안천 유역의 토지피복별 LAI값을 추출하

기 위해 환경부에서 제공하는 2000년 중분류 토지피복도를 8가지 항목으로 재분류하였다. 여기서, LAI 추정과 관련성이 깊은 식물군계로 산림의 경우는 침엽수, 활엽수와 혼효림으로 세분화 하였고, 그 외에는 논, 밭과 초지로 구분하였다. 비교적 관련성이 적은 비식생지역은 시가지/나지와 습지/수역으로 분류하여 사용하였다. 분류 항목 및 피복별 면적과 유역에서 각 면적이 차지하는 비율은 표 4 및 그림 3에 제시하였다.



그림 3. 환경부 토지피복도-경안천 유역

3.3 MODIS LAI

MODIS LAI 추정 알고리즘은 보스턴 대학과 몬타나 대학 연구진에 의해 개발되었다.

표 5. 경안천유역 토지피복별 면적

항목	면적(km ²)	비율(%)
시가지/나지	74.4	13.3
논	45.1	8.0
밭	47.8	9.5
활엽수	192.9	34.4
침엽수	136.3	24.3
혼효림	34.9	6.2
초지	17.1	3.1
습지/수역	12.5	2.2
총계	561.1	100.0

MODIS LAI의 추정은 주 알고리즘과 주 알고리즘 실패 시 적용되는 보조 알고리즘으로 구성된다. 주 알고리즘은 공식 아래 식 (1), (2)와 같이 식생 임관의 3차원 복사전달 모델의 역변환 방식으로 LAI를 산출하는 수학적 모형이다.

$$\rho_c = f(\rho_l, \rho_b, LAI, CC, L(\theta, \phi)) : \text{역변환 (1)}$$

$$LAI = f'(\rho_c) \tag{2}$$

여기서, ρ_c 는 임관층 반사율(RS signal), ρ_l 은 잎 반사율, ρ_b 는 지상부 반사율(토양, 하층 식생), CC는 임관율폐도(canopy closurepercent),

$L(\theta, \phi)$ 는 태양과 센서의 기하학 정보(방위각, 천정각 등), LAI는 엽면적지수를 말한다.

MODIS LAI의 주 알고리즘에서 사용하고 있는 3차원 복사전달 모델은 태양과 센서의 방위각 및 천정각 정보와 식생의 임관구조, 토양 패턴 등의 정보를 이용하여 대상지역의 구조적 특징을 모델링한 것으로 이를 통해 대기 보정된 식생 임관부의 양방향 반사율(BRDF) 수치를 구할 수 있다. 모델링된 양방향 반사율과 센서에 의해 관측된 양방향 반사율 수치를 비교하여 성공적으로 모델링이 진행된다면, 모델링된 양방향 반사율은 식생임관부의 복사전달 상수를 저장한 LUT(Look-up Table)를 적용하여 최종 LAI가 산출된다.

그러나 모델링에 의한 LAI 산출이 불가능한 경우 백업 알고리즘으로 수종별 정규식생지수와 이에 상응하는 LAI를 백업 알고리즘 LUT에 저장하여 주 알고리즘에서 실패된 픽셀에 대해 정규식생지수 수치로 LAI를 산출하게 된다. 또한, LAI 자료와 함께 제공되는 자료처리 정보(Quality Control)는 Product 산출시 특징과 함께 사용한 알고리즘 및 화소 관련 정보가 영상으로 제공된다.

아래 그림 4는 MODIS Product (MOD15)

Algorithm에서 설명하고 있는 정규식생지수와 엽면적 지수의 상관관계를 그래프화 한 것이다. 침엽수림과 활엽수림에서의 관계성을 보면 높은 결정계수를 보이지만, 엽면적 지수가 5이상의 값을 가질 때 상관성을 잘 표현하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 즉 LAI가 5이상의 값을 가질 때 NDVI의 증가량이 현저히 줄어드는 정체현상이 나타나는데, 이러한 상관성은 전 지구적으로 일관성을 띄지 않을뿐더러 수종, 토양 등 지표 상황에 따른 반사영향과 일들의 수관내부구조가 다양하기 때문에 상관관계를 잘 표현하지 못하는 것으로 판단된다. 여기서 단순히 NDVI와 실측 LAI의 관계성을 선형회귀분석을 통해 관계식을 도출하여 LAI 값을 추정한다면 다수의 오차가 발생할 것임을 알 수 있다.

본 연구에 사용 된 2003년~2004년 기간 동

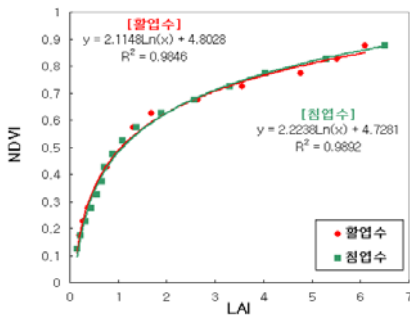


그림 4. MODIS NDVI-LAI 관계식

안의 8일 주기 MODIS LAI영상은 The Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)에서 제공하는 MODIS Reprojection Tool을 이용하여 Korea TM으로 좌표변환을 거친 후, GIS 프로그램을 이용하여 import 하였다. 이때, 영상은 고유 Gain 값과 Offset 값을 가지고 있으므로, LAI 값으로 변환하기 위해 다음 식 (3)을 이용하였다.

$$LAI = 0.1 \times \text{import 영상} + 0.0 \quad (3)$$

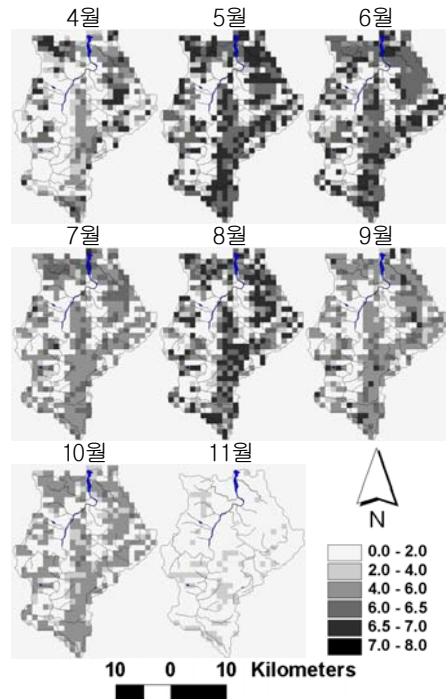


그림 5. 2003년 월별 MODIS LAI 영상

여기서, 0.1 : Gain Value, 0.0 : Offset Value
8일 주기 MODIS LAI 영상은 Surface Reflectance를 기반으로 생산된 Level 4자료로, 대기 보정된 자료이나, 전체적으로 영상의 구름 및 대기의 영향을 최소화하기 위해 MVC (maximum value composite) 기법을 통해 월별 LAI 영상으로 재구축 하였다(그림 5). 구축 된 월별 영상을 살펴보면 평균적으로 7~8월과 겨울철 LAI값이 정확하지 않은 것을 알 수 있었으며, 영상으로도 다른 지역에 비해 부분적으로 눈에 띄게 다른 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 보통 7~8월에 구름이 많은 대기 상황과, 겨울철 고도가 높은 지역은 눈 및 안개의 영향을 받기 때문에 촬영된 영상이 지표 환경을 잘 표현하지 못하는 것으로 판단된다. 그러므로 영상에 대한 보정이 필수적이기 때문에 전, 후월과 비교하여 확연히 튀는 값은 외삽법을 이용하여 피복별로 보간하였다. 단, 겨울철

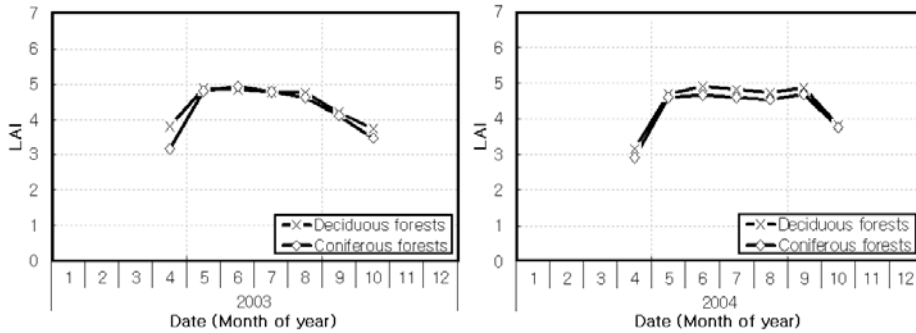


그림 6. 경안천 유역 MODIS LAI

LAI값은 분석 시 제외하고, 보정된 영상을 이용하여 경안천 유역의 침엽수, 활엽수림의 LAI를 추출 후 비교 분석하였다.

연중 LAI 패턴 그래프는 다음 그림 6과 같으며, MODIS LAI값은 침엽수림과 활엽수림에서 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있었다. 수종별로 추정된 MODIS LAI가 각 특성을 잘 반영하지 못하는 것을 의미하며, 이는 연중 옆면적의 변화가 적은 침엽수림 지역과 4~5월부터 옆면적이 증가하는 활엽수림 지역의 특성의 차이를 표현하지 못하는 것으로 판단할 수 있다. 또한, 경안천 유역의 침, 활엽수림 지역의 LAI값은 기존 측정되거나 연구결과 알려진 산림지역 LAI max value(6~7사이 값)에 비해 낮은 값을 보였다.

3.4 NOAA AVHRR NDVI-LAI

LAI를 공간추정하기 위해 NDVI와 LAI의 관계를 이용하는 연구가 많이 수행되어 왔으며, 이는 관계식을 이용하여 추정이 간편하기 때문에 수문순환을 모의하기 위해 여러 수문 모델에서 사용되고 있다. 초지에서는 Aster 등(1985)의 식 (6), 활엽수림에서는 Pierce 등(1993)의 식 (4), 그리고 침엽수림에서는 Spanner 등(1990)의 식 (5)가 제시되었다. Pierce 등(1993)의 식은 떨어진 나뭇잎을 모두 수거하여 LAI를 실측하고 NDVI와의 회귀분석을 통해 도출된 식이며, Spanner 등(1990)의

식은 상대성장측정식(allometric equation : 윤척 등을 이용하여 지상에서 약 1.2m 높이에서 측정된 흉고직경과 잎의 양과의 관계를 이용하여 LAI를 추정하는 방법)을 적용하여 추정된 LAI와 NDVI와의 회귀분석을 통해 도출된 적용식이다.

$$LAI = \left(\frac{NDVI}{0.26} \right)^2 \quad : \text{활엽수} \quad (4)$$

$$LAI = \left(\frac{NDVI}{0.31} \right)^{0.2} \quad : \text{침엽수} \quad (5)$$

$$LAI = NDVI \times 1.71 + 0.4 \quad : \text{초지} \quad (6)$$

$$LAI = LAI1 + DEAD \quad (7)$$

식생정보를 적극 활용할 수 있는 SLURP나 MIKE-SHE 등을 비롯한 여러 수문모형에도 NDVI와의 관계식을 이용하여 LAI를 추정하는 모형을 포함하고 있으며, NOAA와 MODIS 영상을 활용하여 식생정보를 입력할 수 있다.

본 연구에서는 SLURP 모형에 포함된 NDVI를 이용한 LAI 추정 모듈을 활용하였는데, 2003년부터 2004년 기간 동안의 NOAA 위성영상으로부터 추출된 NDVI를 이용하여 침엽수와 활엽수 및 초지 지역에 식(4-6)을 적용하여 LAI를 추정한다. 여기서 산출된 LAI는 강수의 차단을 조절하고, 토양과 잎 표면으로

부터의 증발산량 및 증발량과 식생으로부터의 증산량을 나누는 기준으로 사용하게 된다.

계산식은 식(7-12)과 같으며, NOAA NDVI 영상을 이용하여 토지피복별로 추출된 값을 월별로 입력한 후, "comput LAI from NDVI" 모듈을 실행하여 최종 LAI값을 얻는다. 여기서, 계산식에는 NDVI maximum 값과 minimum 값과 식생 줄기(STEM)값과 일반적인 토지 피복별 LAI maximum 값을 포함하고 있는 SiB.dat 파일을 이용하게 되는데, 이는 각 해당 년도별, 토지피복별로 정확히 입력해 주어야 한다.

여기서, LAI1과 DEAD는 추가 계산식을 내포하고 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$LAI1 = -1 / (-1 / LAI_{max} \times \log 0.5) \times \log(1 - FPAR) + FPAR \times LAI_{max} \quad (8)$$

$$DEAD = MAX[0.0001, (LAI_{month} - LAI1) + STEM] \quad (9)$$

위 식에서 사용된 LAI_{month}, FPAR, FPAR_{month}는 아래와 같이 추가 계산된다.

$$LAI_{month} = -1 / (-1 / LAI_{max} \times \log 0.5) \times \log(1 - FPAR_{month}) + FPAR_{month} \times LAI_{max} \quad (10)$$

$$FPAR = (0.95 - 0.001) \times \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1 + NDVI}{1 - NDVI} \right) - \left(\frac{1 + NDVI_{min}}{1 - NDVI_{min}} \right) \right]}{\left[\left(\frac{1 + NDVI_{max}}{1 - NDVI_{max}} \right) - \left(\frac{1 + NDVI_{min}}{1 - NDVI_{min}} \right) \right] + 0.001} \right\} \quad (11)$$

$$FPAR_{month} = (0.95 - 0.001) \times \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1 + NDVI_{month}}{1 - NDVI_{month}} \right) - \left(\frac{1 + NDVI_{min}}{1 - NDVI_{min}} \right) \right]}{\left[\left(\frac{1 + NDVI_{max}}{1 - NDVI_{max}} \right) - \left(\frac{1 + NDVI_{min}}{1 - NDVI_{min}} \right) \right] + 0.001} \right\} \quad (12)$$

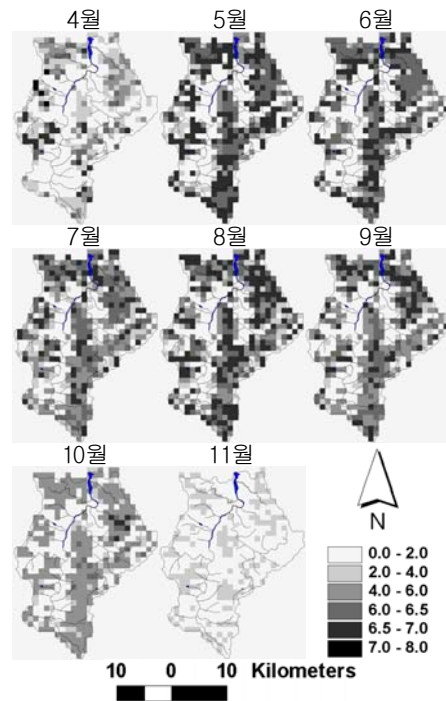


그림 7. 2003년 월별 NOAA LAI 영상

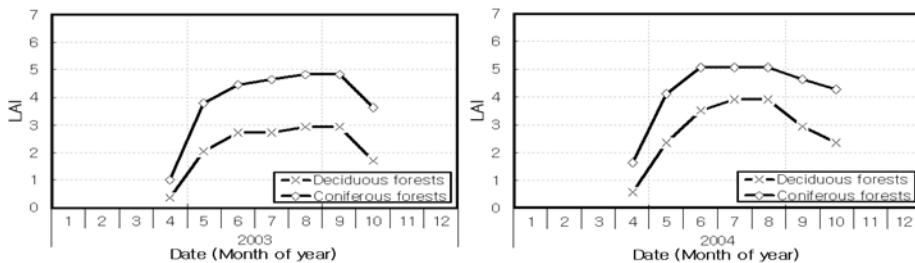


그림 8. 경안천 유역 NOAA NDVI-LAI

여기서, LAI_{max} : LAI의 최고 값,
 $STEM$: 식생 줄기 관련 변수,
 $NDVI_{min}$: 월 NDVI의 2% 값,
 $NDVI_{max}$: 월 NDVI의 98% 값,
 $NDVI_{month}$: 월 NDVI 값.
 모든 값들은 연, 월별로 SiB.dat
 파일 내 입력되는 변수들이다.

이상의 과정을 거쳐 산출된 결과는 그림 7
 및 그림 8과 같다.

3.5 실측 LAI

본 연구에서 MODIS LAI를 검증하기 위한
 기준이 되는 경안천 유역 내 실측 LAI값은 국
 립산림과학원(2007) 보고서와 박지훈(2005)의
 연구논문 결과를 참고하여 2003~2004년 LAI
 수치를 그래프화 하였다. 이 자료들은 2003년
 3월부터 12월까지 총 11회 측정, 2004년 4월부
 터 9월말까지 총 8회 LAI-2000과 AccuPAR
 두 종류의 장비를 사용하여 측정된 자료이며,
 침엽수와 활엽수림을 구분하여 측정된 것이다.

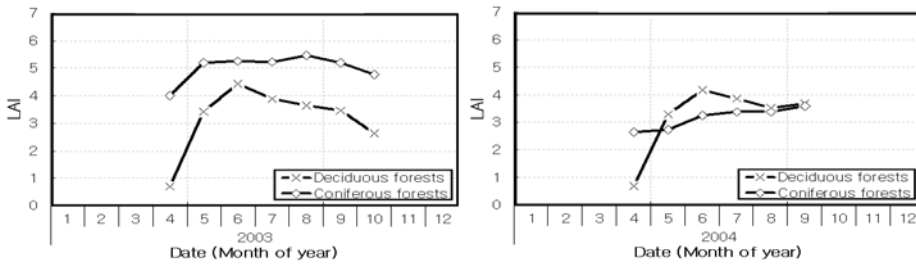
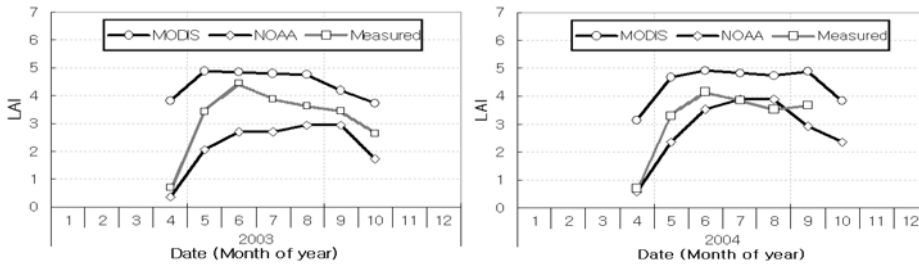
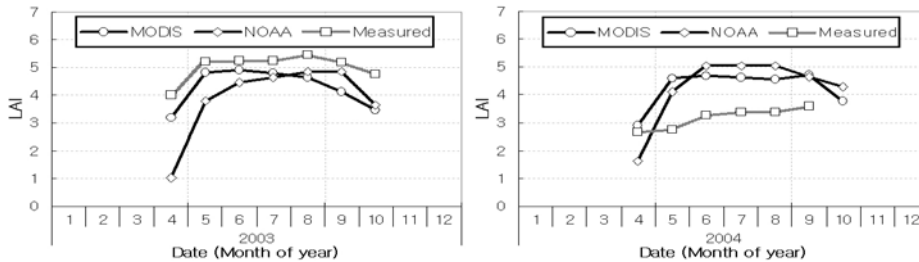


그림 9. 경안천 유역 실측 LAI



(a) 활엽수림 LAI



(b) 침엽수림 LAI

그림 10. MODIS, NOAA, 실측 LAI 비교. (a) 활엽수림, (b) 침엽수림

앞서 언급된 연구결과를 참고하면, 그림 9에서 보이는 그래프와 같이 활엽수림의 LAI는 급격히 증가하는 반면 침엽수림에서는 서서히 증가하는데, 이러한 이유는 활엽수는 지난 가을에 낙엽이 졌다가 이듬해 봄에 잎이 새로 피기 때문이고, 반면 침엽수림의 경우는 잎이 그대로 달려있어 엽면적의 변화가 적기 때문이라고 하였다.

4. 결과 및 고찰

각각 추정된 값을 비교해 보면(그림 10), 활엽수림에서의 MODIS LAI와 비교하여 실측치는 약 14% 정도 낮게 추정 되었으며, NOAA LAI는 약 15~30% 낮게 추정되었다. 특히, 2003년 MODIS와 NOAA 4월 값이 큰 차이를 보였다. 그러나, LAI의 연중 변화양상은 세 경우 모두 잘 표현하는 것으로 나타났다. 침엽수림에서는 MODIS LAI에 비해 2003년 실측치가 약 5% 정도 높게 추정되었으며, NOAA LAI는 4월 값을 제외한 나머지는 7% 정도의 차이를 보였다. 2004년은 MODIS와 NOAA 값은 큰 차이를 보이지 않았지만, 5~9월 실측 LAI값이 MODIS, NOAA에 비해 28% 정도 낮은 값을 보였다. 전체적으로 MODIS LAI와 실측 LAI 값의 상관분석 결과 상관결정계수는 0.7이상으로 높은 상관성을 보였으나, 월별 최대치는 MODIS LAI값이 조금 더 높게 추정되는 것을 확인할 수 있다. NOAA LAI와는 상관성 분석 결과 약 0.5정도 상관성을 보였다.

MODIS LAI는 활엽수림과 침엽수림의 구분이 쉽지 않았는데, 특히 겨울철 침엽수림 지역의 특성을 잘 반영하지 못하는 것으로 보여졌다.

5. 결 론

식생정보를 제공하는 대표적 인자인 NDVI를 비롯하여 LAI는 식물의 엽층에서 발생하는 에너지, 이산화탄소, 질소의 교환과 식물의 구조적 특징을 나타내는 중요한 지수로서 환경

생태나 기상 및 수문분야에서 다양하게 활용되고 있다. LAI는 식생 표면의 광합성, 증발산 등 생태계 생산물의 추정에 매우 유용한 인자로 지표의 에너지, 탄소, 물 순환 및 생태계 식물의 생화학을 추정 또한 가능하게 한다.

이러한 중요성에 근거하여 더욱 정확하고 유용한 LAI 추정 기법의 개발이 요구되므로, 본 연구에서는 자료 획득 및 처리가 용이한 MODIS LAI Product를 평가 하여 활용성을 제시하고자 하였다. 우리나라 실정에 맞는 최적의 LAI 추정을 위한 기법 연구를 수행하고자, 경안천 유역을 대상으로 2003년에서 2004년 기간 동안의 위성영상 자료들을 이용하여 추정 후 비교 검증 하였으며, 결과는 다음과 같다.

1. MODIS LAI가 NOAA NDVI에 비해 10~30% 정도 높게 추정 되었지만, 연중 변화 패턴은 비슷한 경향을 보였다. 실측 LAI값과는 전체적으로 큰 차이를 보이지 않았지만, 2003년 4월 값이 30~43%의 큰 차이를 보였다. 이는 기존 MODIS 위성영상은 NOAA에 비해 좀 더 높게 추정된다는 연구 결과(하림, 2007)를 바탕으로 값의 차이에 대한 설명이 가능하나, 실측값과의 비교에 대해서는 잎이 나기 시작하는 3~4월의 변화에 대해서는 위성 영상의 정확한 촬영이 힘든 것으로 보여진다.

2. MODIS LAI는 실측값에 비해 겨울철 침엽수림 지역의 특성을 잘 반영하지 못하는 것으로 보여 졌다. 이는 MODIS의 공간해상도와 대상유역 토지피복의 대부분을 차지하는 LAI 값이 고지대에 분포 할 경우 구름 및 안개의 영향을 받을 가능성으로 인해 추출값이 부정확할 수 있으며, MODIS LAI추출에 사용된 MODIS 토지피복도와 환경부 토지피복도의 분류항목 차이 등으로 인하여 침엽수, 활엽수의 구분이 쉽지 않은 것으로 판단되었다.

본 연구에서 사용된 실측 LAI는 일부 지점(인천 계양산)을 기준으로 관측된 자료로, 경안천 유역의 LAI 검증을 위한 자료로서는 오차가 있기 때문에, 향후 대상 지역에 대한

정확한 실측 LAI 자료를 이용한 추가 검증 연구가 요구되어진다. 또한 MODIS LAI값이 수 관구조가 복잡한 지역에서 조금 높게 추정되는 것과, 피복분류 항목의 차이 등을 고려하여 효율 적이고 정확한 보정작업이 필수적이다. 따라서 토지피복별로 평균되어 추출 된 것을 감안하여, 지형적인 특성을 고려한 지점별, 고도별, 경사향 등에 따른 LAI의 분석이 추가되어야 할 것이다.

추가 연구를 향후 진행함과 동시에, 정확도 높은 추출 알고리즘 적용 및 보정을 통한 MODIS LAI는 장기간 지구적인 식생정보를 제공하는 데 있어 유용하며 실용적일 것으로 판단하였다. 단, 구름 밑 눈의 영향을 많이 받는 겨울철(1~2월, 11월~12월) 및 구름과 안개의 영향을 받는 초봄(3~4월)의 MODIS 영상은 불확실성을 내포하고 있으므로 추출값을 그대로 사용하는 것은 무리가 있을 것이다. 그러나 그 외의 계절은 엽면적의 연중 패턴을 잘 나타내고 있으며, 자료 확보의 편의성과 실용성에 의거하여 MODIS LAI는 향후 광역적 물수지 모의를 위한 수문모형 및 지역적 식생 변화 모의 모형의 입력 자료로서 활용성 또한 증대될 것으로 판단된다. **KAGIS**

참고 문헌

- 김선화. 2003. 한반도 중부 온대림지역에서 MODIS 엽면적지수 검증. 인하대 석사학위논문.
- 김지연. 2004. Landsat 위성영상에서 산출한 NDVI와 현장자료를 이용한 MODIS LAI 평가. 서울대 석사학위논문.
- 박지훈. 2005. MODIS 위성자료에 기반한 식물 순생산량 알고리즘 분석. 인하대 석사학위논문.
- 장기창. 2005. 산림지역 증발산량 추정을 위한 원격탐사 엽면적지수 비교. 인하대 석사학위논문.
- 박종화, 전택기, 나상일, 박민서. 2005. NOAA AVHRR 데이터를 이용한 한반도의 순별 NDVI와 LAI 특성. 한국농공학회 05 학술발표논문집 649-654쪽.
- 김광섭, 임태경. 2005. NOAA-AVHRR 자료로부터 유도된 남한지역 LAI 변화 분석. 한국수자원학회 05 학술발표회 논문집. 908-911쪽.
- 김주훈, 김경탁. 2005. LAI를 고려한 잠재증발산량 추정. 한국지리정보학회지 8(4):1-13.
- 국립산림과학원. 2007. 극다중분광 영상자료의 산림정보 해석 및 활용기법 개발. 국립산림과학원 53-62쪽.
- 하림, 신형진, 김성준. 2007. 위성영상을 이용한 기후변화에 따른 미래 식생정보 예측 기법 제안. 한국지리정보학회지 10(3):58-69.
- Myneni, R.B. and D.L. Williams. 1994. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment* 49(3) 200-211.
- Yin, Z. and T.H.L. Williams. 1997. Obtaining spatial and temporal vegetation data from Landsat MSS and AVHRR/NOAA satellite images for a hydrologic model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63(1) :69-77.
- Sandholts, Y. Gu, S. Bélair, J.F. Mahfouf and G. Deblonde. 2006. Optimal interpolation analysis of leaf area index using MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 104(3):283-296.
- Andersen, J., G. Dybkjaer, K.H. Jensen, J.C. Refsgaard and K. Rasmussen. 2002. Use of remotely sensed precipitation and leaf area index in a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology* 264(1-4):34-50.
- Ayman A.S., T.A.B. Jawad, and D. Mohammad. 2007. A Comparison Study of MODIS and ASCE Alfalfa Evapotranspiration in a Semiarid Climate. 2007 ASAE Annual Meeting 072153.
- Prasanna, H.G, L.C. Jose and D.C. Paul, A.H. Terry, C.S. Robert, H.M. Thomas. 2007. Relationship between LAI and Landsat TM Spectral Vegetation Indices in the Texas Panhandle. 2007 ASAE Annual Meeting 072013.
- Tang, S., J.M. Chen, Q. Zhu, X. Li, M. Chen, R. Sun, Y. Zhou, F. Deng and D. Xie. 2007. LAI inversion algorithm based on directional reflectance kernels. *Journal of Environmental Management* 85(3):638-648.
- Jan, P and M.C. Jing. 2007. Comparison and validation of MODIS and VEGETATION global LAI products over four BigFoot sites in North America. *Remote Sensing of Environment* 109(1):81-94.
- EOS Data Gateway : <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/index.html> **KAGIS**