韓國環境復元技術學會誌 20(4)：29～42(2017)
J. Korean Env. Res. Tech. 20(4)：29～42(2017)
DOI：https://doi.org/10.13087/kosert.2017.20.4.29
ISSN 1229-3032

위성영상 시공간 융합과 CASA 모형을 활용한 산지 개발사업의 식생 순일차생산량에 대한 영향 평가

김예화[1)] · 주경영[2)] · 성선용[1)] · 이동근[3)]

[1)] 서울대학교 협동과정조경학 · [2)] 서울대학교 대학원 · [3)] 서울대학교 조경지역시스템공학부

Impact Assessment of Forest Development on Net Primary Production using Satellite Image Spatial-temporal Fusion and CASA-Model

Jin, Yi-Hua[1)] · Zhu, Jing-Rong[2)] · Sung, Sun-Yong[1)] and Lee, Dong-Kun[3)]

[1)] Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University,
[2)] Graduate School, Seoul National University,
[3)] Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University.

ABSTRACT

As the “Guidelines for GHG Environmental Assessment” was revised, it pointed out that the developers should evaluate GHG sequestration and storage of the developing site. However, the current guidelines only taking into account the quantitative reduction lost within the development site, and did not consider the qualitative decrease in the carbon sequestration capacity of forest edge produced by developments. In order to assess the quantitative and qualitative effects of vegetation carbon uptake, the CASA-NPP model and satellite image spatial-temporal fusion were used to estimate the annual net primary production in 2005 and 2015. The development projects between 2006 and 2014 were examined for evaluate quantitative changes in development site and qualitative changes in surroundings by development types. The RMSE value of the satellite image fusion results is less than 0.1 and approaches 0, and the correlation coefficient is more than 0.6, which shows relatively high prediction accuracy. The NPP estimation results range from 0 to 1335.53 g C/㎡ year before development and

First Author : Jin, Yi-Hua, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University,
Tel : +82-2-880-4885, E-mail : yehwa88@snu.ac.kr
Corresponding Author : Lee, Dong-Kun, Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University,
Tel : +82-2-880-4875, E-mail : dklee7@snu.ac.kr
Received : 30 May, 2017. **Revised** : 20 July, 2017. **Accepted** : 16 July, 2017.

from 0 to 1333.77 g C/㎡ year after development. As a result of analyzing NPP reduction amount within the development area by type of forest development, the difference is not significant by type of development but it shows the lowest change in the sports facilities development. It was also found that the vegetation was most affected by the edge vegetation of industrial development. This suggests that the industrial development causes additional development in the surrounding area and indirectly influences the carbon sequestration function of edge vegetaion due to the increase of the edge and influx of disturbed species. The NPP calculation method and results presented in this study can be applied to quantitative and qualitative impact assessment of before and after development, and it can be applied to policies related to greenhouse gas in environmental impact assessment.

Key Words : *Carbon absorbtion function, Spatio-temporal fusion method, CASA-NPP model, Landsat image, MODIS image*

I. 서 론

산림 식생은 광합성을 통해 대기 중의 이산화탄소를 흡수하는 탄소흡수원으로써 기후변화를 완화하는 중요한 역할을 하고 있다(성선용 등, 2015). 산림은 우리나라의 주요한 생태자원이지만 성장위주의 국토개발정책으로 인하여 산림개발의 수요가 여전히 발생하고 있다(김예화 등, 2015). 산림 개발은 대부분 지표면의 식생을 제거하여 탄소흡수원의 직접적인 손실을 초래하고 가장자리가 형성하게 된다(Adam MC et al., 2012). 이는 개발지 내 탄소흡수원의 양적인 감소와 가장자리 식생 기능의 질적인 감소로 이어진다.

2011년 “온실가스 환경평가 가이드라인”이 개정되면서 개발사업자는 환경영향평가서 작성 시 에너지 사용 등에 의한 온실가스 배출뿐만 아니라 식생 등에 의한 온실가스 흡수와 저장도 함께 고려하여 평가를 실시하고 이를 최소화 할 수 있는 방안을 강구해야 한다고 지적하였다(환경부, 2011; 황상일 등, 2011). 하지만 현재 가이드라인에서는 개발지 내부에서 손실된 식생을 대상으로 양적인 감소만 고려하고 있고 개발지와 인접한 주변지역 식생에 대한 질적인 감소를 고려하지 않고 있다.

현재 가이드라인에서는 개발지 안의 단목위주 또는 녹지유형과 영급을 활용한 생체량 회귀산정식을 활용하는 방법을 제안하고 있다. 이는 수목의 생장량을 이용하는 방법으로 수목을 직접 계측하여 바이오매스량과 이산화탄소 흡수량을 산출하는 방법이다. 이 방법은 간편한 산정식으로 개발지 내 식생의 탄소 축적량과 흡수량을 계산할 수 있으나 초지나 농경지에서의 탄소흡수량 산정이 어렵고 개발로 인한 주변 식생의 질적인 영향을 평가하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 산림개발로 인한 탄소흡수원의 양적 또는 질적 영향을 평가할 수 있는 방법이 필요한 실정이다.

식생의 탄소흡수 기능을 평가하는 방법에는 생체량 회귀 모형 외에도 위성영상을 이용한 원격탐사기법(Running et al., 2004) 이 있다. 위성영상을 활용한 방법은 넓은 면적에서의 탄소흡수원의 정량적인 산정과 간접적인 영향을 모니터링 할 수 있다는 장점이 있다. 위성영상을 이용한 원격탐사기법은 식생지수와 기상요소를 이용한 모형(Rojas, 2007; Ren et al., 2008; Na et al., 2012), 엽면적 지수와 식생 생육 모형을 결합한 모형(Doraiswamy et al., 2005; Noemi, 2010), 광합성 유효복사율을 이용한 모형(Potter et a., 1993; Tao et al., 2005) 등이 있다. 식생지

수와 기상요소를 이용한 모형은 생육시기 동안 수량과의 상관성이 높은 시기의 식생지수 및 기상요소와 수량과의 관계식을 이용한 방법이다. 이 방법은 정확도가 높다는 장점이 있지만 모형이 개발된 지역에서만 제한적으로 사용이 가능하고 입력자료의 균질성 및 대표성의 확보가 선행되어야 한다는 단점이 있다. 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)와 식생 생육모형을 연합한 방법은 위성영상을 이용하여 LAI를 산출한 후 이를 생육모형에 입력하는 방식이다. 이 모형은 가장 정확한 생물물리모델을 기반으로 하고 있어 소규모 지역에서 정확도가 높지만 기상정보와 각종 작물의 생물리학적 입력정보가 필요하다는 단점이 있다. 광합성 유효복사율을 이용한 방법은 식물의 광합성을 기반으로 순일차생산량을 산정하는 방법이다. 이 방법은 비교적 간단한 물리모델을 기반으로 하고 있어 적용이 쉽고 다양한 식생피복에서 평가가 가능하며 식생현황 및 넓은 공간에서도 비교적 정확하게 평가할 수 있다는 장점이 있다(Na et al., 2014).

연간 순일차생산량(Net Primary Production, NPP)을 산정하기 위하여 월별 영상이 필요하다. 광학센서로 제공되는 위성영상 중 시간해상도가 높은 영상은 MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) 영상으로 식물의 생물계절적인 특성을 파악하여 월별 탄소흡수량을 평가할 수 있다는 장점이 있다(Goward et al., 1985; Malingreau, 1989; Marsett et al., 2006; McRoberts and Tomppo, 2007; Morisette et al., 2006). 그러나 공간해상도가 250m-1km로 광범위한 지역 분석에는 유용하나 소규모 지역 분석에는 공간 스케일에서의 한계가 있다(Brown et al., 2008 ; Huete et al., 2002). 반면, 공간해상도가 비교적 높은 Landsat과 같은 영상은 획득 시간대가 정해져 있고 운량 및 불안정한 대기조건으로 인해 연속적인 자료획득에 한계가 있다(Frantz et al., 2016). 이러한 위성영상의 시간해상도와 공간해상도를 높이고자 최근에는 픽셀 기반 영상의 시공간 융합 연구가 진행되고 있다 (Gao et al., 2006; Roy et al., 2008; Zhu et al., 2010).

이에 본 연구의 목적은 다음과 같다. 첫째, 2006년에서 2014년 사이에 일어난 산지개발사업을 대상으로 개발 전과 후의 연평균 순일차생산량을 산정하며 양적 및 질적 평가가 가능한 방법론을 제안하는 것이다. 이를 위해 위성영상을 활용하여 시공간 융합과 빛이용효율에 기반한 모형을 활용하여 연평균순일차생산량을 산정하고자 한다. 둘째, 본 연구에서 제기한 NPP 산정 방법을 활용하여 산지개발사업 유형별로 개발사업 내부지역과 주변 지역 식생의 탄소흡수 기능에 대한 영향을 평가하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상지

본 연구에서는 산림 자원이 풍부하지만 개발이 많이 일어나는 영남권 지역을 대상으로 분석하였으며 공간적 범위는 Figure 1과 같다. 산지개발사업은 영상에 위치한 2006년에서 2014년 사이에 진행된 개발 사업 총 167건을 대상으로 분석하였고 그 중 산지 전용 빈도수가 가장 많은 산업단지 개발사업 30건, 관광단지 개발사업 26건, 체육시설 41건, 토석광물 채취 사업 35건에 대하여 사업 유형별로 산림 식생의 탄소흡수 기능에 대한 영향을 평가하였다. 시간적 범위는 개발 실행되기 전인 2005년도와 개발 후의 2015년도를 대상으로 분석하였다.

2. 위성영상 시공간 융합

위성영상의 시공간해상도에서의 한계점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 시공간해상도를 향상시키는 위성영상융합기법인 FSDAF (Flexible spatiotemporal data fusion) (Zhu et al., 2016)를 통해 2005년과 2015년의 월별 30m 공간해상도인 정규화식생지수(Normalized Difference Vegetation index; NDVI)를 구축하였다.

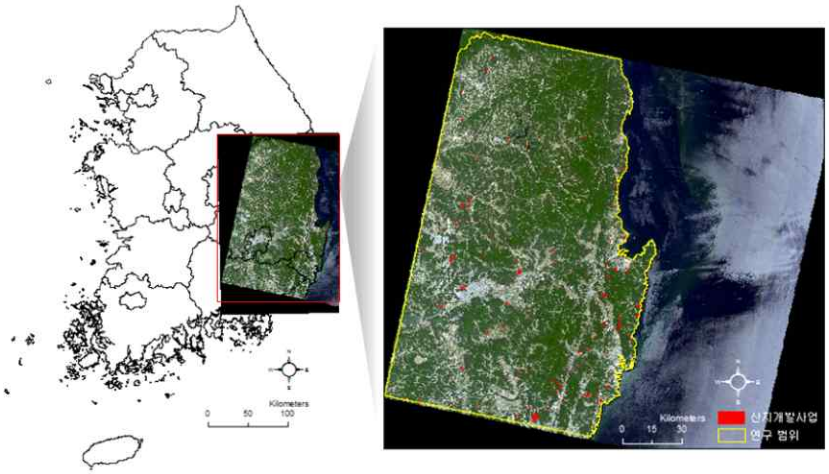

Figure 1. Study site(Landsat 8 OLI, path 114, row 35)

1) 데이터 수집 및 전처리

본 연구에서는 Landsat 영상과 MODIS 영상을 시공간융합 방법을 통해 예측하였다. 영상 예측의 정확도를 높이기 위하여 연구대상지의 운량이 적은 Landsat 영상이 필요하며 본 연구에서는 2015년 4월 16일에 촬영된 영상을 선택하였다. 예측에 필요한 MODIS 영상은 1월부터 12월까지의 MOD13Q1 NDVI를 사용하였다. MOD 13 자료는 매일 취득한 영상을 16일 주기로 MVC(Maximum value composite) 방법을 통해 구름의 영향을 최소화한 자료이다. 영상융합에 활용된 영상의 정보는 Table 1과 같다. 영상 융합에 활용된 Landsat 영상(F1)의 대기 및 굴절 등을 보정(Pat S. Chavez, 1996)하기 위하여 FLAASH를 활용하여 대기 보정하였다(FLAASH, 2009). 검증에 활용된 Landsat 영상도 대기보정을 하였으며 구름이 있는 부분을 제거하였다.

MODIS 영상과 Landsat 영상의 기하학적 왜곡을 조절하기 위하여 MRT(MODIS Reprojection Tool)를 활용하여 Landsat 영상과 같은 UTM 52zone좌표로 변경하였다. MODIS 영상의 공간해상도는 Landsat 영상과의 중첩을 위해 융합에 알맞게 240m로 조절하였다. MODIS영상에는 구름에 의한 이상 값이 있기 때문에 MOD35

Table 1. Information of satellite images

Data type	Acquire time	Spatial resolution	Cloud	Band	Role	Tile
Landsat OLI	2015.04.17.; 2005.06.24	30m	1%	Red, NIR band	Input (fine-resolution image at t1; F1)	Path114 Row35
	2015.08.07		9%		Validation	
	2015.10.10		4%			
MOD13Q1 (250m_16days_NDVI)	2015.04.23. 2005.04.23	250m	-	NDVI, RED, SWIR band	Input (Coarse-resolution image at t1; C1)	h28v05
	2015.01.17.~ 2015.12.17. 2005.01.17.~ 2005.12.17.			NDVI, RED, SWIR band	Input/Predict (Coarse-resolution image at t2; C2)	

Note: t1: fine image acquisition time(2005 and 2015); t2: time of image to predict(2005 and 2015)

cloud mask를 활용하여 이상 값들을 제거하였다.

2) **위성영상 융합 기법**

FSDAF 융합기법은 위성 영상 시공간 융합 기법 중 입력 자료의 최소화, 융합 정확도, 시간에 따른 공간 변화 반영 등 장점이 있는 융합 기법이며 아래의 6단계 절차를 거친다(Zhu et al., 2016).

첫째, F1 영상의 무감독 분류를 통해 클래스를 구분한다. F1 영상의 분류를 통해 각 coarse 픽셀에서 각 class가 차지하는 비율을 계산하였으며 이 과정은 각 클래스에서 기간에 따른 값의 변화를 추정하는데 활용된다. 둘째, C1과 C2 영상에서의 시간에 따른 각 클래스의 값의 변화를 계산한다. 이 과정에서는 분광선형혼합이론(spectral linear mixing theory)을 기반으로 시간 경과로 인한 클래스 값의 변화를 추정한다. 셋째, 각 클래스 값의 변화를 통해 t2에서의 값을 예측한다. 이 과정에서는 t1에서 t2 사이에 공간적인 변화가 없다는 가정 하에 진행된다.

만약 공간적인 변화가 발생하지 않는다면 t1의 영상에 시간적인 변화 값을 더하여 최종 예측을 할 수 있지만, 수표면 또는 농지, 활엽수림 등은 계절에 따라 무감독 분류를 통해 구분한 각 클래스의 공간적인 변화가 발생하기에 공간적인 변화를 예측하는 과정이 필요하다. 따라서 네 번째 단계에서는 공간적인 변화를 예측하기 위하여 이미지 워핑 함수인 TPS(Thin Plate Spline) 보간 함수를 활용하여 C2 영상을 다운스케일링 한다. TPS는 주어진 평면상의 점들에서 주어지는 데이터 값을 모두 지나는 최소로 변형이 되는 최소 곡면을 찾는 방법이다. TPS를 통해 얻어낸 공간 스케일이 30m인 영상에서 세 번째 단계에서 예측한 도면을 덜어내어 공간적 변화가 발생한 픽셀을 추출한다. 다섯째, 공간적 변화가 나타난 픽셀 값과 3번째 단계에서 구축한 시간에 의한 변화 값을 통합하여 잔여 값들을 재배치한다. 여섯째, 각 클래스에서 목표 픽셀과 가장 유사한 픽셀을 선택하여 가중치를 주어 극값들을 보완하고 최종 예측 결과를 도출한다.

FSDAF 융합기법은 시간 경과에 따른 토지피복 변화를 반영한 시공간 융합 기법으로 입력 자료는 t1 시기의 MODIS 영상 및 Landsat 영상과 예측 시기인 t2 시기의 MODIS 영상이 필요하다(Table 1). 본 연구에서는 전처리 과정을 거

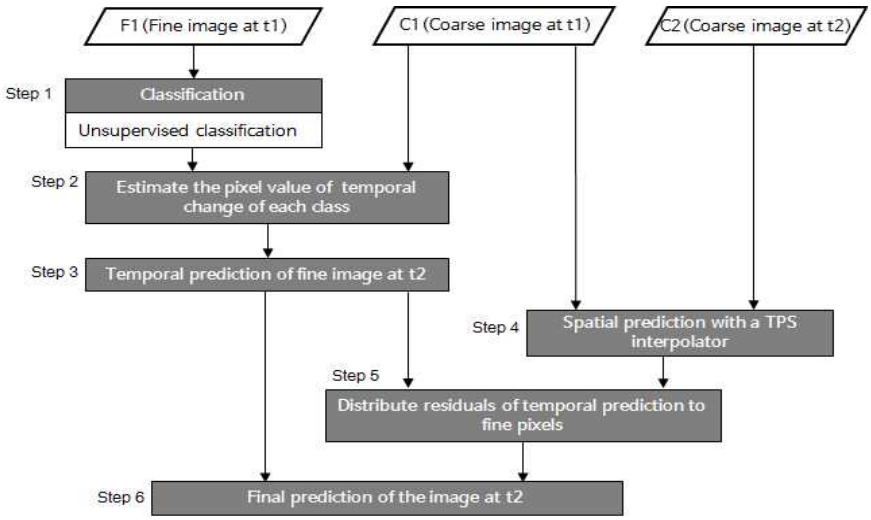

Figure 2. Flowchart of the FSDAF method(Remade flowchart based on Zhu et al., 2016)

친 Landsat 영상에서 RED 밴드와 NIR(Near Infra Red) 밴드를 이용하여 NDVI를 계산하여 입력자료로 활용하였으며 이를 이용하여 월별 NDVI를 예측하였다.

예측한 영상의 정확도 검증에는 주로 RMSE (Root mean square error)지수와 상관지수를 활용하였다. RMSE 지수는 관측 값의 불일치도를 나타내기 위해 오차의 제곱근을 산술 평균한 값의 제곱근으로 예측의 전체적인 편향을 나타낸다(Wald, 2002). 각 샘플의 RMSE 값이 0.1 미만이어야 정확도가 높다고 판단할 수 있다 (Chai and Draxler, 2014). 예측한 영상과 실제 영상과의 상관성을 분석하기 위하여 피어슨 상관계수(R)를 계산하였다. 일반적으로 R값이 0.7이상이면 강한 선형관계를 가진다고 할 수 있다(Lee and Roh, 2013).

본 연구에서는 융합하여 예측한 영상의 정확도를 검증하기 위하여 운량이 10% 미만인 Landsat 영상의 NDVI 실제 값과 비교하여 정확도를 검증하였다. 2015년 Landsat 영상 중 구름에 의한 영향이 비교적 적은 8월, 10월의 영상을 검증에 활용하였고 영상 정보는 Table 1과 같다.

3. 순일차생산량 산정

본 연구에서 탄소 흡수량은 기후 및 토지피복 현황을 보다 정확하게 표현할 수 있는 빛 이용효율을 계산하는 CASA모형을 활용하여 순일차생산량(NPP)을 계산하였다. CASA 모형은 월단위의 모의가 가능한 전 지구 단위의 생산효율성 모형으로 토양수분, NPP, 토양탄소 및 토양질소의 3가지 부모형(submodel)으로 구성되어 있다 (Potter et al., 1993). 이 중에서 NPP 모형은 빛 이용효율에 의하여 NPP를 계산하도록 설계되어 있고 이는 흡수된 태양 복사량이 광합성을 통해 유기물로 전환되는 비율을 정량화한 지수이다. 특히 빛이용효율은 원격탐사 기법이 적용 가능하고 광역지역에 대한 식생의 빛 흡수량 및 순수탄소 흡수량을 추정할 수 있기에 주로 위성영상기반의 모형에 사용되며(Potter et al., 1993; Field et al., 1995) 식 (1)과 같이 계산된다.

$$NPP = Sr \times NDVI \times E_{\max} \times T_{scalar} \times W_{scalar} \quad (1)$$

CASA-NPP 모형은 지표 일사량(Sr; MJ/㎡)와 NDVI, 최대 빛이용효율($E_{\max}$), 기온 영향지수(T_{scalar}), 습도 영향 지수 W_{scalar}로 구성된다. 식생의 최대 빛이용효율을 나타내는 $E_{\max}$는 식생이 광합성에 사용되는 유효복사량의 최대 빛이용효율로 식생 피복별로 다른 값을 가지며 Table 2와 같다(Xu et al., 2015; Running et al., 1988).

Table 2. Maximum light efficiency by vegetation cover

Vegetation cover types	Maximum light efficiency (g C/MJ)
farmland	0.604
grassland	0.768
coniferous forest	0.888
broadleaf forest	1.044
others(urban ect.)	0.389

(Xu et al., 2015; Running et al., 1988)

T_{scalar}와 W_{scalar}는 기온과 수분이 식생의 성장에 따른 빛 이용효율에 대한 영향 지수이며 각 영향지수를 구하는 식은 (2)~(5)와 같다. CASA 모형을 통해 계산한 NPP 계산 결과는 USGS에서 제공하는 MODIS NPP와 비교하여 상관성을 검증하였다.

$$T_1 = 0.8 + 0.002\,T_{opt}(x) - 0.0005(T_{opt}(x))^2 \quad (2)$$

$$T2(x) = C/1 + e[0.2\,T_{opt} - 10 - T(x,t)]/ \\ 1 + e[0.3(-T_{opt}) - 10 + T(x,t)] \quad (3)$$

Topt는 NDVI가 최고 값을 가질 때의 평균 기온이고 C는 상수이다.

$$W(x) = (1 + NDWI(x))/(1 + NDWI(\max)) \quad (4)$$

$$NDWI = (V_{SWIR} - V_{RED})/(V_{SWIR} + V_{RED}) \quad (5)$$

4. 산림개발사업 전 후 탄소흡수기능 평가

개발 사업 시행 전 후의 탄소흡수 기능은 양

Table 3. Information of data used for analyze before and after developments

data name	Period	Source
Monthly mean temperature, Solar radiation	2015.01~12 2005.01~12	NCDSS (National Climate Data Services System)
Land use/Land cover in 2007		EGIS (Environmental Geographic Information Services)
Land use/Land cover in 2013		

적인 감소와 질적인 감소를 평가하였다. 개발 전과 후의 두 시점의 기능을 비교하기 위하여 위성영상 시공간 융합으로 구축한 월별 NDVI와 CASA-NPP 모형을 결합하여 2005년과 2015년의 탄소흡수기능을 정량적으로 계산하여 비교 분석하였고 개발 전 후 시점의 기후 및 임상 데이터 정보는 Table 3과 같다.

산림개발로 인한 탄소흡수기능의 양적인 영향 평가는 개발지 내에서 감소된 NPP를 계산하였다. 산림개발로 인한 탄소흡수기능의 질적인 영향평가는 개발지 경계로부터 100m 버퍼를 분석범위로 설정하여 개발 전과 후에 모두 포함되는 식생 피복을 추출하여 NPP 변화량을 산정하였다. 이는 산림 가장자리가 생성되었을 때 가장자리에서 산림 내부로 100m의 범위까지 수목의 고사율과 발아율이 가장 가변적이라는 연구결과를 바탕으로 설정하였다(Laurance et al., 2007). 개발지 주변지역에서의 개발 전후 식생 유무는 토지피복도를 활용하였다.

개발사업은 환경영향평가법에서 제시한 대상사업 가운데 산림지역에서 발생한 사업 중 발생빈도가 가장 많은 개발사업 유형(국토환경정보센터)인 일반산업단지, 관광단지, 체육시설, 토석광물채취 사업에 대해 사업 유형별 양적 및 질적 영향의 차이를 분석하였으며 분산분석을 통해 검증을 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 위성영상 융합 및 NPP 산정 결과

시공간 스케일 향상을 위한 시공간 융합 결과는 Table 4와 같다. Table 4는 예측한 NDVI 결과와 Landsat NDVI에서 하천, 도시 등에서 나타나는 NDVI 값이 0보다 작은 픽셀을 제외한 식생이 존재하는 모든 픽셀에 대해 검증한 결과이다. 본 연구에서 예측한 8월과 10월 NDVI의 RMSE 값은 각각 0.03, 0.06로 실제 값과 비교적 일치한 것으로 나타났다. 또한 상관성 분석결과 8월과 10월은 0.863, 0.717로 비교적 상관성이 높은 것을 볼 수 있다. 탄소흡수량은 개발 전 0-1335.53 g C/㎡/year, 개발 후 0-1333.77 g C/㎡/year까지의 범위를 보이고 있으며 Figure 3과 같다.

2. 산림개발사업으로 인한 탄소흡수기능의 양적 및 질적 변화

Landsat 영상에 포함된 산림 개발사업의 개발 전과 후의 NPP 변화량을 계산한 결과 사업 지역 내에서는 2005년 평균 414.2 g C/㎡/year에서 2015년 평균 372.0 g C/㎡/year로 평균 42.2 g C/㎡/year 감소되었고 개발지 주변지역에서는 평균 471.7g C/㎡/year에서 466.1g C/㎡/year로 평균 5.6g C/㎡/year 감소된 것으로 나타났다(Table 5).

Table 4. Satellite image spatiotemporal fusion accuracy

	2015 August	2015 October
RMSE	0.03	0.06
R	0.863	0.717

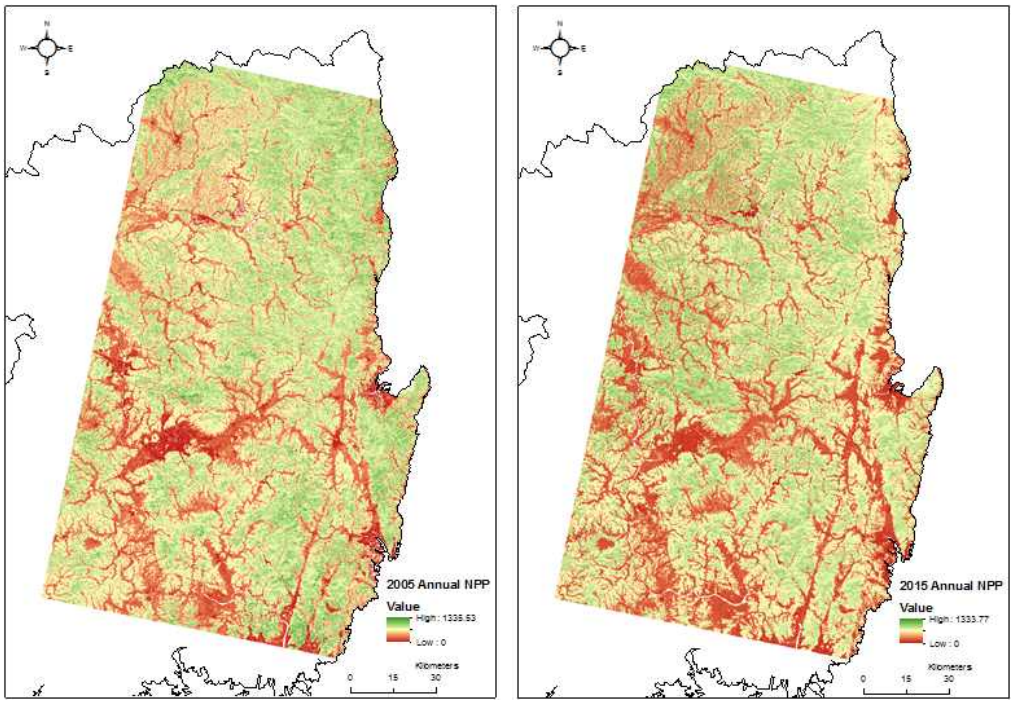

Figure 3. Annual NPP in 2005(left) and 2015(right)(g C/㎡/year)

Table 5. Annual NPP before and after developments(g C/㎡/year)

type	2005 mean(std.)	2015 mean(std.)	differences (std.)
in site	414.2(134.9)	372.0(142.6)	-42.2(135.3)
edge	471.7(109.6)	466.1(115.2)	-5.6(68.4)

다음 개발사업지 유형별로 분석한 결과 개발지 내에서의 양적인 변화는 산업단지가 평균 66.1g C/㎡/year 감소, 관광단지는 평균 52.6 g C/㎡/year 감소, 체육시설은 평균 1.3g C/㎡/year 감소, 토석광물채취는 평균 67.2g C/㎡/year 감소된 것으로 나타났다. 분산분석 결과 F 값이 1.884(p>0.05)로 개발사업 유형별로 개발지 내부에 대한 양적인 변화에는 차이가 없음을 나타낸다. 평균 값 비교 결과 산업단지 개발사업과 토석광물채취사업에서 가장 큰 변화 값을 보이고 있으며 이는 개발 시 개발지 내의 식생을 대부분 제거하기에 양적인 변화에서 가장 높게 나타났다. 체육시설 산지개발사업 유형에서 가장 적은 감소를 보이고 있으며 이는 체육시설 개발사업은 사업 유형 특성 상 녹지로 구성되어 있기 때문에 NPP 변화량이 적음을 알 수 있으며 본 연구에서 제시한 방법은 교목뿐만 아니라 초지 등 기타 유형의 녹지에서도 평가 가능한 것을 알 수 있다(Table 6).

산지 개발지 주변 100m 이내 산림에서의 식생 탄소흡수기능에 대한 질적인 영향을 살펴보면 산업단지 개발사업에서 NPP가 49.4 g C/㎡/year 감소되어 기타 사업 유형보다 명확한 차이가 있음을 확인할 수 있다. 산업단지 개발사업은 사업지 내의 모든 산림이 개발지로 변화할 뿐만 아니라 개발이 진행되면서 주변지역에서 도로 및 기타 형태의 개발이 동시에 진행되고 있다. 이로 인해 가장자리가 생성되고 산림 내

Table 6. Quantitative change in development sites(g C/㎡/year)

types	mean difference	Std.	F(Sig.)
Industrial complex	-66.1	123.3	1.884 (p=0.135)
Tourist complex	-52.6	177.8	
Sports facility	-1.3	113.0	
Minerals extraction	-67.2	153.4	

부 식생이 노출되면서 토양 수분이 기존의 상태에서 변하게 된다. 또한 식생 피복이 개발지로 변하면서 개발지 내의 지표 온도가 상승하고 겨울철 공장의 가동으로 인한 열 발생은 개발지 주변 지역의 온도를 기존의 온도보다 상승하는 효과를 주고 있다. 산업단지 개발사업의 이러한 특성으로 인한 산림생태계 구조적인 변화는 주변 산림 식생의 생장시기의 생산성 또는 식생 활력도에 영향을 주게 되어 기타 사업 유형보다 더 많은 양의 NPP가 감소되는 것으로 판단된다. 그밖에 가장자리의 생성은 교란종 및 외래종의 유입을 초래하여 산림 식생의 활력도에 영향을 주게 된다(김은영 등, 2016). 그러나 개발사업 주변지역 산림 식생에서 일부 임상에서는 NPP 변화가 없거나 다소 증가한 지역이 있는데, 이는 각 산업단지의 개발 구조와 형태에 따라 주변 식생에 주는 영향의 강도에서 나타나는 차이라고 판단되며 사후 환경영향평가를 통해 지속

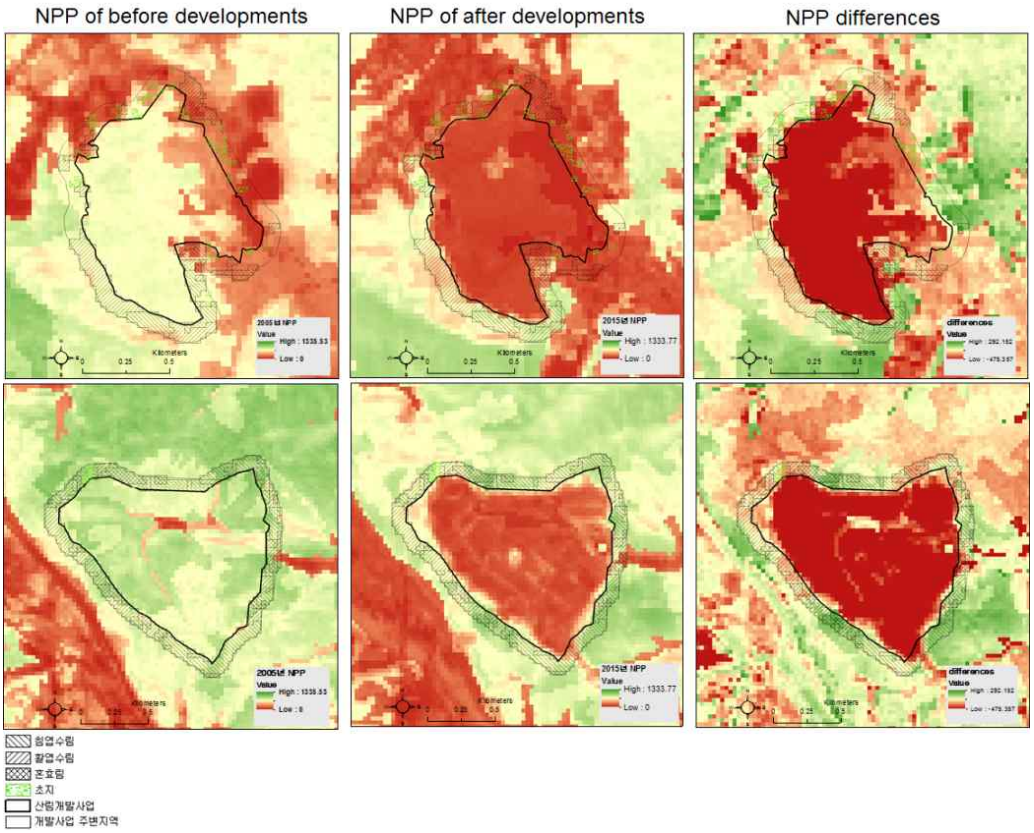

Figure 4. Comparing NPP before and after developments of industrial complex

Table 7. Qualitative change in edge surrounding developments(g C/㎡/year)

types	mean difference	Std.	F(Sig.)
Industrial complex	-49.4	64.4	7.417 (p=0.00)
Tourist complex	-19.0	80.1	
Sports facility	+11.3	58.0	
Minerals extraction	+16.7	56.5	

적인 모니터링이 필요하다.

그밖에 관광단지 개발사업 주변 지역 산림 식생의 NPP는 평균 19.0g C/㎡/year 감소되었지만 표준편차가 80.1 g C/㎡/year 로 개별 사업 형태에 따라 영향이 다른 것을 알 수 있다. 체육시설 또는 토석광물채취 사업 유형에서는 개발 사업 주변지역 산림 식생에 개발 전후 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 체육시설 개발사업과 토석광물 채취개발 사업 및 관광단지 개발사업은 사업 주변의 토지피복 변화가 비교적 적으며 가장자리 식생에 주는 영향이 비교적 적은 것으로 사료된다(Table 7).

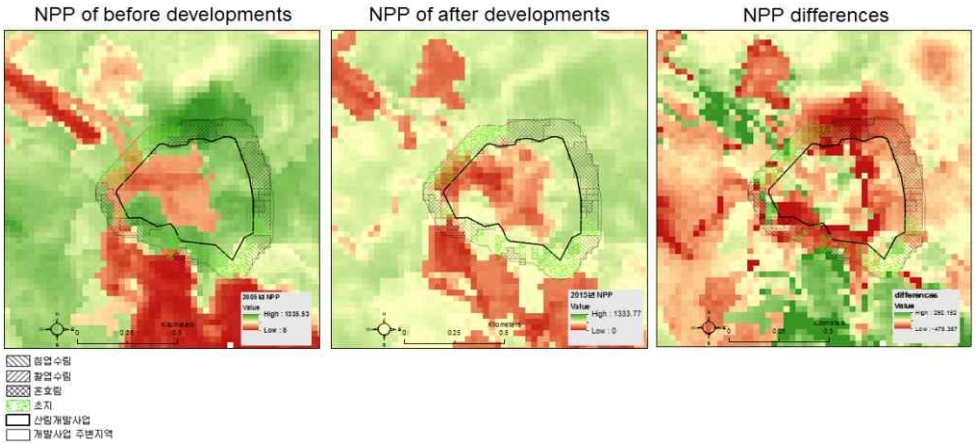

Figure 5. Comparing NPP before and after developments of Tourist complex

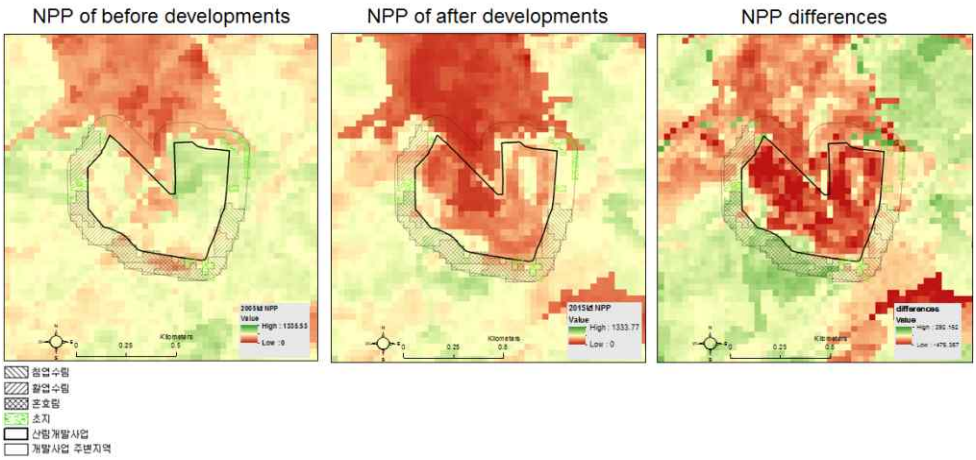

Figure 6. Comparing NPP before and after developments of Sports facility

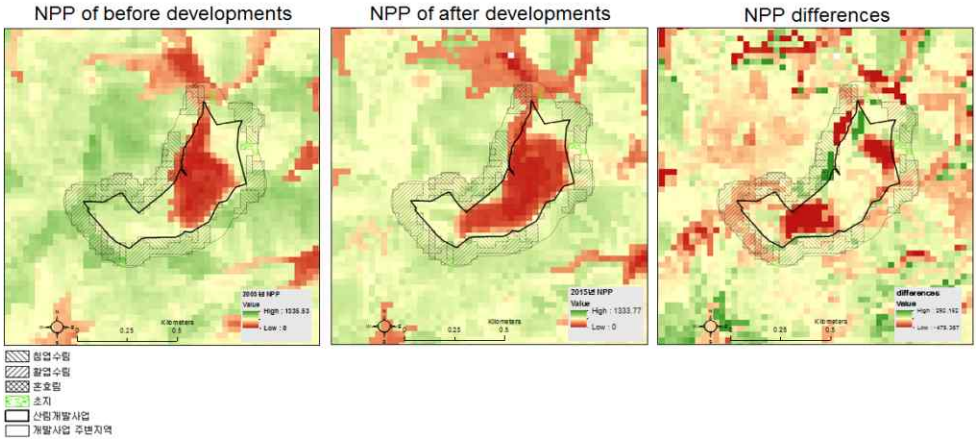

Figure 7. Comparing NPP before and after developments of Minerals extraction

IV. 결 론

본 연구에서는 FSDAF 시공간 영상 융합 기법과 CASA-NPP 모형을 활용하여 영남지역의 2005년과 2015년 연평균 NPP를 산정하였다. 이 방법은 위성영상 구축에서 구름 및 대기조건에 의해 연속적인 영상 또는 연구목적에 따라 원하는 시간대의 영상을 얻기 어려운 문제를 해결해 주고 있다.

위 방법을 활용하여 산지개발사업으로 인한 연평균 순일차생산량이 개발지 내에서의 양적인 감소와 개발지 주변 가장자리 식생에서의 질적인 감소를 평가하였다. 결과 산업단지 개발사업에서 양적인 변화와 질적인 변화가 가장 많이 나타났다. 이는 산업단지는 개발지 내 대부분 식생을 제거하기 때문에 양적인 변화가 기타 사업 유형보다 현저한 차이를 보이고 있다. 또한 산업단지 개발로 인하여 원래의 산림 내부 식생이 노출되면서 생태계 구조적인 변화를 야기한다. 특히 겨울철 산업단지 공장의 가동은 노출된 지역의 온도 상승과 토양수분 저감을 초래하며 생산성에 영향을 주는 것으로 사료되며 그 밖에 산림과 개발지 인접지역의 교란종 등 영향도 받을 것이라 판단된다. 그러나 본 연구에서는 개발전과 개발후의 NPP를 직접 비교하였으며 이는 식생 성장시기의 기온, 강수량 등에 의한 영향으로 인한 차이는 고려하지 않아 본 연구에서의 한계점이라고 사료된다.

본 연구 결과는 환경성 평가 시 개발사업 내부는 개발 면적에 따른 정량적인 생산성 변화량을 산출하여 개발로 인한 직접적인 영향 평가가 가능하며, 개발지 외부의 식생도 개발에 따른 영향을 받기에 적절한 대안 제시가 필요함을 시사하고 있다. 특히 산업단지 개발사업 같은 경우는 개발지 주변 식생의 생산성에 대한 대안 제시와 사후 모니터링을 통한 지속적인 관리가 필요함을 보여주고 있다. 마지막으로 본 연구에서 제기한 위성영상의 시공간 융합기법과 빛이용효율을 결합한 NPP산정 방법은 개발 전 뿐만 아니라 개발 후에도 지속적인 모니터링과 산림지역뿐만 아니라 기타 녹지에서도 정량적인 양적 및 질적인 영향 평가에 활용 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산림청 “산림과학기술개발사업(과제번호 : S111415L050110)”과 환경부 “환경정책기반공공기술개발사업 (과제번호: E416-00021-0604-0)” 및 “2016년도 BK21 플러스 사업(서울대

학교 협동과정조경학 그린인프라 창조 인재 양성팀)"의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

References

Adam MC. · Kneeshaw D and Beckley TM. 2012. Forestry and road development: direct and indirect impacts from an Aboriginal perspective. Ecology and Society. 17(4), 1.

Brown ME. · Lary DJ. · Vrieling A. · Stathakis D. and Mussa H. 2008. Neural networks as a tool for constructing continuous NDVI time series from AVHRR and MODIS. International Journal of Remote Sensing. 29(24), 7141-7158.

Chai T. and Draxler RR. 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?Arguments against avoiding RMSE in the literature, Geosci. Model Dev. 7(3), 1247-1250.

Doraiswamy PC. · Sinclair TR. · Hollinger S. · Akhmedov B. · Stern A. and Prueger J. 2005. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment. Remote Sens.Environ. 97, 192-202.

Filed CB. · Randerson JT. and Malmstrom CM. 1995. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. Remote Sensing of Environment. 51, 74-88.

FLAASH M. 2009. Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide, Version 4.7. Boulder, CO, USA.

Frantz D. · Stellmes M. · Roder A. · Udelhoven T. · Mader S. and Hill J, 2016. Improving the Spatial Resolution of Land Surface Phenology by Fusing Medium and Coarse Resolution Inputs. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54(7), 4153-4164.

Gao F. · Masek J. · Schwaller M. and Hall F, 2006. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predictiong daily Landsat surface reflectance, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 44(8), 2207-2218.

Goward SN. · Cruickshanks GD. and Hope AS. 1985. Observed Relation between Thermal Emission and Reflected Spectral Radiance of a Complex Vegetated Landscape. Remote Sensing of Environment. 18, 137-146.

Huete A. · Didan K. · Muira T. · Rodriguez E P. · Gao F. and Ferreira LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment. 83(12), 195-213.

Hwang SI and Park SH. 2011. A Comparative Study on Estimation Methodologies of Carbon Sequestration Amount by Vegetation for Environmental Impact Assessment on Development Projects. Journal of Environmental Impact Assessment. 20(4), 477-487.

Jin YH · Jeong SG · Jeong SG · Lee DK. 2015. Assessment on the Forest Conservation Value Considering Forest Ecosystem Services-The case of Gapyung-gun. Journal of Environmental Impact Assessment. 24(5), 420-431. (in Korean with English summary)

Kim EY · Song WK · Yoon EJ · Jung HJ. 2016. Definition of Invasive Disturbance Species and its Influence Factor: Review. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology. 19(1), 155-170. (in Korean with English summary)

Laurance WF. · Nascimento HEM. · Laurance

SG. · Andrade A. · Ewers RM. · Harms KE. · Luizao RCC. and Ribeiro JE. 2007. Habitat Fragmentation, Variable Edge Effects, and the Landscape-Divergence Hypothesis. PLoS ONE. 2(10), e1017.

Lee H. and Noh S. 2013. Advanced Statistical Analysis: Theory and Practice. Moonwoosa.

Malingreau JP. 1989. The vegetation index and the study of vegetation dynamics. Ispra Courses. Springer Netherlands.

Marsett RC. · Qi J. · Heilman P. · Biedenbender SH. · Watsonm MC. · Amer S. · Weltz M. · Coodrich D. and Marsett R. 2006. Remote Sensing for Grassland Management in the Arid Southwest. Rangeland Ecology & Management. 59(5), 530-540.

McRoberts R. and Tomppo E. 2007. Remote Sensing support for national forest inventories. Remote Sensing of Environment. 110(4), 412-419.

Ministry of Environment. 2011. Guidelines for Environmental Assessment of Greenhouse Gases. (in Korean with English summary)

Morisette JT. · Heinsch FA. and Running SW. 2006. Monitoring Global Vegetation using Moderate Resolution Satellites. Eos Trans. AGU. 87(50), 568-568.

Na S. · Hong S. · Kim Y. and Lee K. 2014. Estimation of Corn and Soybean Yields Based on MODIS Data and CASA Model in Iowa and Illinois. USA. Korean J. Soil Sci. Fert. 47(2), 92-99.

Na SI. · Park JH. and Park JK. 2012. Development of Korean Paddy Rice Yield Prediction Model (KRPM) using Meteorological Element and MODIS NDVI. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers. 54(3), 141-148.

Noemi G. 2010. Estimating Maize Grain Yield from Crop Biophysical Parameters Using Remote Sensing. Digital Commons@University of Nebraska-Lincoln.

Pat S. and Chavez J. 1996. Image-Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 62, 1025-1036.

Potter CS. · Randerson JT. and Field CB. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochem Cy. 7, 811-841.

Ren JQ. · Chen ZX. · Zhou QB. and Tang HJ. 2008. Regional Yield Estimation for Winter Wheat with MODIS-NDVI Data in Shandong, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 10, 403-413.

Rojas O. 2007. Operational Maize Yield Model Development and Validation Based on Remote Sensing and Agro-meteorological Data in Kenya. Int.J.Remote Sens. 28(1), 3775-3793.

Roy DP. · Ju J. · Lewis P. · Schaaf C. · Gao F. · Hansen M. and Lindquist E. 2008. Multi-temporal MODIS-Landsat data fusion for relative radiometric normalization, gap filling, and prediction of Landsat data. Remote Sensing of Environment. 112(6), 3112-3130.

Running SW. and Coughlan JC. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I: Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. Ecological Modelling. 42(2), 125-154.

Sung SY · Lee DK · Mo YW. 2015. Comparison of Carbon Stock Between Forest Edge and

Core by Using Connectivity Analysis. Journal of Korean Society of Rural Planning. 21(4), 27-33. (in Korean with English summary)

Tao F. · Yokozawa M. · Zhang Z. · Xu Y. and Hayashi Y. 2005. Remote Sensing of Crop Production in China by Production Efficiency Models: Models Comparisons, Estimates and Uncertainties. Ecological Modelling. 183, 385-396.

Wald L. 2002. Data fusion: definitions and architectures: fusion of images of different spatial resolution. Presses des MINES.

Xu JR. · Dong JH. and Yang HB. 2015. Land cover change and its impact on net primary productivity in China's typical temperate grassland system in the past 25 years: A study of the Huangfuchuan Watershed. Remote sensing for land and resources. 27(2), 118-125.

Zhu X. · Chen J. · Gao F. · Chen X. and Masek JG. 2010. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. Remote Sensing of Environment. 114(11), 2610-2623.

Zhu X. · Helmer EH. · Gao F. · Liu D. · Chen J. and Lefsky MA. 2016. A flexible spatio-temporal method for fusing satellite images with different resolutions. Remote Sensing of Environment. 172, 165-177.