시계열 MODIS 영상자료를 이용한 산림의 연간 탄소 흡수량 지도 작성

차수영*† · 피웅환** · 박종화***

*서울대학교 아시아에너지지속가능발전연구소, **삼성종합기술원, *** 서울대학교 환경대학원

Mapping and estimating forest carbon absorption using time-series MODIS imagery in South Korea

Cha Su-Young*†, Pi Ung-Hwan** and Park Chong-Hwa***

*Asian Institute for Energy, Environment & Sustainability, Seoul National University

**High Performance Device Group, Samsung Advanced Institute of Technology

*** Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

Abstract : Time-series data of Normal Difference Vegetation Index (NDVI) obtained by the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) satellite imagery gives a waveform that reveals the characteristics of the phenology. The waveform can be decomposed into harmonics of various periods by the Fourier transformation. The resulting n^{th} harmonics represent the amount of NDVI change in a period of a year divided by n . The values of each harmonics or their relative relation have been used to classify the vegetation species and to build a vegetation map. Here, we propose a method to estimate the annual amount of carbon absorbed on the forest from the 1st harmonic NDVI value. The 1st harmonic value represents the amount of growth of the leaves. By the allometric equation of trees, the growth of leaves can be considered to be proportional to the total amount of carbon absorption. We compared the 1st harmonic NDVI values of the 6220 sample points with the reference data of the carbon absorption obtained by the field survey in the forest of South Korea. The 1st harmonic values were roughly proportional to the amount of carbon absorption irrespective of the species and ages of the vegetation. The resulting proportionality constant between the carbon absorption and the 1st harmonic value was 236 tCO₂/5.29ha/year. The total amount of carbon dioxide absorption in the forest of South Korea over the last ten years has been estimated to be about 56 million ton, and this coincides with the previous reports obtained by other methods. Considering that the amount of the carbon absorption becomes a kind of currency like carbon credit, our method is very useful due to its generality.

Key Words : Carbon estimation, Forest, Biomass, Fourier Transform Analysis, Harmonics, MODIS, Time-series data

접수일(2012년 7월 18일), 수정일(1차 : 2013년 8월 23일, 2차 : 10월 7일), 게재확정일(2013년 10월 18일).

† 교신저자: 차수영(younga74@gmail.com)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

요약: 매일 단위로 수신되는 MODIS 인공위성자료를 이용하여 계산한 시계열 식생지수 자료는 1년 주기의 생물계절 특성을 나타내는 복잡한 파형으로 표현될 수 있다. 이러한 복잡한 파형도 단순한 파형의 합성으로 이루어지는데 이산 푸리에 변환 분석 기법은 이들을 각각의 하모닉들로 추출해 내어 다양한 주기별로 생육을 달리하는 식생의 특성을 설명할 수 있다. 특히 이산 푸리에 분석을 통해 도출된 시계열 식생지수 자료의 1차 하모닉 값은 1년 동안 변화하는 총 잎의 성장량을 나타내는 것으로써 나무의 상대성장회귀식 추정에 의해 식생이 1년 동안 탄소를 흡수한 양을 나타내는 지상부 바이오매스량을 설명한다. 따라서 1차 하모닉 값의 변화량은 1년 동안 식생이 탄소를 흡수하는 양을 나타낸다고 할 수 있는데, 시계열 MODIS 자료에서 추출된 6220여개의 표본들의 1차 하모닉 10년 평균값과 산림청의 입목 축적량 데이터를 통해 추정된 연간 단위면적당 이산화탄소 흡수량을 이용하여 수종별 비례상수를 도출할 수 있었다. 남한 산림지역에 한하여 총 이산화탄소 흡수량은 2000년 이후 10년 평균 약 5천6백만톤으로 계산되었고 이것은 발표된 남한 산림의 연간 이산화탄소 흡수량에 근접하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 보편적 비례상수를 이용하여 식생의 연간 탄소 흡수량을 추정함으로써 시계열 위성영상 자료를 이용하여 매년 변화하는 산림의 이산화탄소 흡수량 지도를 반복하여 정량적으로 제작할 수 있는 환경공간정보를 제공한다.

1. 서론

온실가스 인벤토리를 작성하는 것과 배출 감축 프로그램을 실행하기 위해서는 광범위한 지역에 대해 지속적으로 산림탄소 흡수량을 계측하기 위한 과학적으로 엄격한 방법이 필요하고, 특히 최근 교토의정서의 합의서를 이행하기 위해서 지역수준의 탄소량을 정량적으로 측정하는 것이 요구되고 있다(IPCC, 2003; Gibbs *et al.*, 2007). 또한, 탄소배출권 조림(Afforestation and Reforestation Clean Development Mechanism, A/R CDM) 및 산림전용과 산림황폐화 방지를 통한 온실가스 감축방안(Reducing Emission from Deforestation and Degradation, REDD) 이행과 관련하여 산림의 이산화탄소 흡수량의 정량적인 정의 및 방법론의 개발이 중요하다(Niels and Sathaye, 2008).

현장 조사를 바탕으로 수목의 탄소량을 추정하는 방법은 크게 육상생태계의 현존량과 연간성장량을 활용한 입목성장모형을 이용하는 것과(Ohtsuka *et al.*, 2007), 플렉스 타워관측에 의한 평가 그리고, 산림대 수목을 직접 벌채하여 추정하는 직접 측정방법 등이 있고 동시에, 산림의 수종별 탄소흡수량에 대한 과학적인 연구를 바탕으로 위성영상 자료를 이용하여 지상부 바이오매스를 정량화 하고 현장조사 자료와 통합한 연구가 활발히 진행되고 있다(Huiyan *et al.*, 2006; Blackyard *et al.*, 2008; Rahman *et al.*, 2008; Wulder *et al.*, 2008; Fuchs *et al.*, 2009).

유엔기후변화협약 규정에 의해 이러한 모니터링 방

법들은 원격탐사 기법과 지상부 산림의 탄소 흡수량 목록과의 조합을 이용하여 인간의 간섭과 관련된 산림의 흡수원, 산림의 탄소 축적량, 산림면적의 변화에 의한 온실가스 방출을 측정하는데 초점을 맞추고 있는데(Patenaude *et al.*, 2005; DeFries *et al.*, 2007; Herold *et al.*, 2007; Smith *et al.*, 2008; Goetz *et al.*, 2009), 이러한 신기술을 활용한 방법은 시간과 비용이 많이 드는 현장조사를 보완할 수 있는 방법으로 인정되고 있고, 산림의 탄소 저장고로서의 역할이 기대되고 있다.

국내에서는 Son *et al.*(2007)과 Yim *et al.*(2009)가 국내 산림통계자료와 단일시기의 위성영상 자료를 이용하여 육상 생태계의 탄소 순환에 대한 정량적인 분석을 다양하게 시도하고 있으나 매년 변화하는 산림의 탄소 흡수량 및 축적량에 대한 정보를 바탕으로 한 탄소지도를 제작하기에는 비용 및 방법적인 측면에서 시간과 노력이 많이 요구된다.

따라서, 본 연구는 이산 푸리에 변환 분석의 하모닉 기법을 매일 단위로 획득되는 시계열 MODIS 위성영상 식생지수 자료를 이용하여 매년 변화하는 지상부 바이오매스를 추정하여 남한 산림의 연간 이산화탄소 흡수량을 계산하고 탄소지도를 제작하는 할 수 있는 정량적인 기법을 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 자료 및 방법

1) 연구 자료

(1) MODIS 정규식생지수(NDVI) 자료

1일(Daily) 단위로 제공되는 MODIS 식생지수 산출물(MOD13Q1) 자료는 데이터의 에러를 제거하고 자료 처리 효율을 위하여 8일, 16일, 30일 등의 자료로 합성하여 제공하고 있는데 본 연구에서는 16일 합성자료를 이용하였다. 이 자료는 매년 1월1일을 기준으로 16일 간격으로 제공되는데 16일 동안의 식생지수 값 중 가장 높은 값을 가장 정확한 값으로 보고 그 값을 취하는 Maximum Value Composite (MVC) 기법으로 처리되어 있다. MVC 기법은 MODIS 자료와 같이 한반도 전체를 포함하고 매일 얻어지는 위성영상 자료를 이용할 때 대기의 영향이나 구름과 그 그림자로 인한 간섭을 최소화할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 이는 구름 등의 기상상황 등에 의해 식생지수 값이 실제보다 낮게 산정된 것을 배제시키기 위함이다. 위성영상 자료의 셀(Cell)의 크기는 231×231 (m) 이고, 한반도가 위치한 위도 33° ~ 43° 와 경도 123° ~ 133° 지역을 포함하는 h27v04, h27v05, h28v04, h28v05 조각들(Tiles)을 미국 나사의 지구관측시스템을 통해 획득하였다. Sinusoidal 투영체계를 UTM Zone 52N 좌표체계로 변환하였으며 연구 대상지역인 남한 지역으로 추출하였다. 이러한 과정을 2000년부터 2009년까지 1년에 16일 단위의 자료를 23개씩, 10년 동안 총 230개의 파일에 적용하였다. 이중 7개 자료(2000년 1월 1일, 17일, 2월 2일, 3월 22일, 2004년 7월 28일, 2008년 7월 28일, 10월 16일)는 원 데이터에 오류로 인해 10년 평균 값을 대치하여 적용하였다.

(2) 식생자료

식생자료는 환경부 및 산림청에서 각각 제작한 현존식생도와 임상도를 이용하였다. 전국적인 현존식생도는 1986년부터 현재까지 전국자연환경조사를 통하여 제작되고 있으며, 남한지역에 분포하는 약 170여 개의 식물 종 군집의 경계선과 속성정보가 1:25,000 의 축척으로 생태자연도의 속성자료 형태로 제공되고 있다. Fig.1은 개개의 수종들을 낙엽활엽수림(노란색), 상록침엽수림(녹색)으로 크게 구분한 것으로서 남한지역의 약 75%이상이 각각 이들의 대표 수종인 신갈나무와 소나무가 우점하고 있는 것을 확인할 수 있다. 현존식생도는 개개의 수종명이 속성자료로 제공되고 있기 때문에 소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무, 편백, 상수리나무, 신갈나무 등 우리나라 주요 8대 수종별로 제공되는 연간 이산화탄소 흡수량 자료와의 상관성을 분석하기 위해 시계열 MODIS 위성영상 자료의 식생지수 값의 표본을 추출하기 위해 이용되었다. 한편, 남한 산림의 전체 면적을 대상으로 연간 이산화탄소 흡수량을 계산하기 위해서는 산림청에서 제공하는 임상도를 기본도로 사용하여 대표 수종별 면적 및 임상구분을 이용하였다.

Fig. 1. Actual vegetation map(Ministry of Environment, 2007).

무가 우점하고 있는 것을 확인할 수 있다. 현존식생도는 개개의 수종명이 속성자료로 제공되고 있기 때문에 소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무, 편백, 상수리나무, 신갈나무 등 우리나라 주요 8대 수종별로 제공되는 연간 이산화탄소 흡수량 자료와의 상관성을 분석하기 위해 시계열 MODIS 위성영상 자료의 식생지수 값의 표본을 추출하기 위해 이용되었다. 한편, 남한 산림의 전체 면적을 대상으로 연간 이산화탄소 흡수량을 계산하기 위해서는 산림청에서 제공하는 임상도를 기본도로 사용하여 대표 수종별 면적 및 임상구분을 이용하였다.

2) 연구 방법

(1) 푸리에 변환기법(Fourier Transform analysis)을 이용한 하모닉(harmonic) 분석

매일 단위로 수집 되는 시계열 인공위성 자료는 1년 단위로 주기적으로 생육상태가 변화하는 식생의 생물계절특징을 나타내는 복잡한 파형으로 표현될 수 있는데, 식생지수와 같은 복잡한 파형은 아래 Fig. 2.의(a)와 같이 단순한 파형의 합성으로 이루어진다.

Fig. 2. Analysis of the complex wavelength using discrete Fourier Transform Analysis (a) curves for harmonic terms 1, 2, and 3 and (b) simple cosine curve representative of the first harmonic(Jakubauskas *et al.*, 2002).

Table 1. Relationship between vegetation biophysical parameters and harmonic cycle elements

Cycle Elements	Vegetation biophysical parameters
Wavelength	The period taken to complete one cycle
Amplitude	The change of the productivity
Phase	The time of the maximum productivity

시계열 식생지수 자료에 대한 푸리에 변환 분석 알고리즘은 복잡하고 주기적인 식생의 사이클을 아래의 식(1)~(5)를 이용하여 식생의 생물리화학적 특성을 반영하는 각각의 주기에 대한 크기(Amplitude)와 위상(Phase) 값으로 분해하여 이들을 각각 0차, 1차, 2차 등 하모닉들로 추출해 내어 Fig. 2의(b)와 같은 다양한 주기별로 생육을 달리하는 식생의 특성을 설명할 수 있다(Table 1).

$$F(u) = \sum_{t=0}^{N-1} f(t) \times e^{-2\pi i u t / T} \quad (1)$$

식(1)은 실제부분인 식(2)와 가상부분인 식(3)으로 분해될 수 있다.

$$F_c(u) = \sum_{t=0}^{N-1} (f(t) \times \cos(2\pi \frac{ut}{T})) \quad (2)$$

$$F_s(u) = \sum_{t=0}^{N-1} (f(t) \times \sin(2\pi \frac{ut}{T})) \quad (3)$$

여기서 t 는 식생지수의 레이어 개수, $f(t)$ 는 x 번째 표본 값이므로 여기서는 식생지수 값을 나타낸다. U 는 푸리에 주기의 개수, T 는 전체 레이어의 개수, $F_c(u)$ 는 실제 부분인 코사인 곡선 $F(u)$ 는 가상 부분인 사인 곡선이다. 푸리에 분석을 통한 하모닉 값의 $F(\text{amplitude})u$ 와 $F(\text{phase})u$ 가 각각 식(4)와(5)로 도출된다.

$$F(\text{Amplitude})u = \sqrt{F_c^2(u) + F_s^2(u)} \quad (4)$$

$$F(\text{Phase})u = \arctan\left(\frac{F_s(u)}{F_c(u)}\right) \quad (5)$$

(2) 1차 하모닉값을 이용한 식생의 연간 이산화탄소 흡수량 추정

위성영상자료에서 식생은 700 mm 근처에서 명확한 흡수 파장대와 반사파장대를 가지고 있으므로 그 반사율의 차이가 상당히 크고, 이러한 식생의 흡수 및 반사 파장대에 착안하여 식생에 관한 원격탐사 기법을 실행하기 위하여 많은 지수들이 개발 되어 왔다. 이처럼 각 파장대에 따른 반사특성에 기초를 두고 분광대간의 특성을 조합하여 식생의 밀집도 등으로 구하는 식을 만드는 것이 가능한데, 식생의 활력도를 나타내는 식생지수는 식생의 생산량과 직접적인 상관관계성이 있기 때문에(Reed *et al.*, 1994) 생·물리학적 및 생태학적인 목적으로 이러한 지수들이 많이 응용되어왔다. 또한, 식생지수는 21개의 표본점에 대해 시기별 영상에서 198개의 샘플 자료를 대상으로 분석한 결과에서 생물리적인 파라미터인 엽면적 지수(Leaf Area Index, LAI), 생체량(Biomass), 광합성유효복사율(fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation, fPAR)과 양의 상관성이 존재함이 증명되었다(Fig. 3).

따라서, 연간 식생의 생산성과 위성영상을 이용해서 측정되는 식생지수 사이의 서로 긴밀한 상관성은 식(6)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 연간 식생에 의해서 흡수되는 이산화탄소 흡수량($C_{\text{vegetation}}$)은 이전 연구들에서 식생의 생산량을 측정할 수 있는 식생지수의 최대 최소값의 차이로 변환할 수 있고 γ 는 비례상수이다.

$$C_{\text{vegetation}} = \gamma [\max(\text{NDVI}) - \min(\text{NDVI})] \quad (6)$$

그러므로, 푸리에 분석을 통해 도출된 시계열 식생지수 자료의 1차 하모닉 값은 1년 주기로 변동하는 식생의 생산량 즉, 식생의 최대 생산량과 최소 생산량의 차이를 나타내므로 1년 동안 식생지수 프로파일의 최대 최소값

Fig. 3. Relationship between NDVI and Biomass(g/m²), fPAR, and LAI(Wylie *et al.*, 2002).

사이의 차이는 1차 하모닉의 크기(A_1)를 의미한다. 이는 한 계절 주기 동안 식생이 성장하기 위해 사용된 광합성 양의 최대값과 최소값을 의미하고 이는 식생에 의해 흡수되는 이산화탄소의 양을 나타내므로, 1년 동안 성장 시즌에서 식생의 생산성은 식(7)과 같이 1차 하모닉의 크기에 비례한다.

$$C_{vegetation} = \beta A_1 \quad (7)$$

따라서 최종적으로 식생의 연간 이산화탄소 흡수량(C)는 1차 하모닉(A_1)값에 비례상수를 적용한 것으로 수식(8)과 같이 추정할 수 있다.

$$C = \alpha A_1 \quad (8)$$

(3) 보편적 비례상수 계산을 위한 현장 표본 자료 추출

남한 산림의 주요 8대 수종 - 신갈나무와 소나무를 주종으로 한 상수리나무, 편백, 낙엽송, 리기다소나무, 잣나무에서 측정된 임목축적량을 바탕으로 바이오매스 환산계수를 이용하여 추정된 연간 단위면적(ha)당 표준 이산화탄소량 흡수량과 시계열 위성영상 자료의 퓨리에 변환을 이용하여 도출된 1차 하모닉 값과의 상관 비례식을 검증하기 위해서 총 6220개의 표본을 추출하였다(Fig. 4, Table 2).

Fig. 4.에서와 같이 6220여개의 참조자료는 현존식생 도에서 제공되는 단일 수종으로 이루어진 폴리곤을 대상으로 2400개의 소나무, 3220개의 신갈나무, 350개의 상수리나무, 120개의 낙엽송, 80개의 리기다소나무, 40개의 잣나무, 10개의 편백나무로부터 각각의 표본지점

Fig. 4. Sample points to extract the 1st harmonic value.

이 서로 약 5 km 거리를 유지하도록 하는 무작위 추출 방법으로 표본지점을 선택하였다.

표준 이산화탄소 흡수량 자료는 소나무, 참나무 등 우리나라 주요 8대 수종에 대해서 지난 40년간 전국에 걸쳐 3,212개의 숲을 조사한 결과를 토대로 해서 2003년도에 기후변화협약에서 정한 국제표준방법인 탄소축적 차이법에 의해서 조사 분석된 자료이다. 탄소축적 차이법은 나무가 광합성에 의해서 이산화탄소를 흡수한 것

Table 2. Amount of CO₂ absorption based on the species and ages of tree(tCO₂/ha/year)(Korea Forest Service, 2009)

Species \ Age(year)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
<i>Pinus densiflora</i> (Kangwon area)	7.4	7.83	7.91	8.11	8.11	8.11	7.97	7.97	7.83	7.68	7.54	7.26	7.11
<i>Pinus densiflora</i> (Middle area)	5.83	7.68	8.54	8.68	8.54	8.11	7.54	7.11	6.69	6.26	5.83	5.41	5.12
<i>Pines koraiensis</i>	8.64	9.39	9.67	9.82	9.82	9.67	9.53	9.39	9.25	9.11	8.82	8.68	8.54
<i>Larix kaempferi</i>	11.32	11.32	11.17	10.72	10.43	9.98	9.68	9.23	8.94	8.64	8.34	8.04	7.74
<i>Pinus rigida</i>	8.25	8.68	8.97	9.26	9.41	9.41	9.41	9.41	9.41	9.41	9.41	9.26	9.12
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	7.56	7.44	7.32	7.2	7.08	7.08	6.95	6.95	6.83	6.83	6.83	6.83	6.71
<i>Quercus acutissima</i>	11.48	11.88	12.09	12.09	11.88	11.48	11.08	10.68	10.07	9.67	9.27	8.86	8.46
<i>Quercus mongolica</i>	15.52	14.5	13.68	12.87	12.25	11.44	10.83	10.42	9.8	9.4	8.99	8.58	8.17

Table 3. Proportional coefficient derived from 1st harmonic value and CO₂ absorption rate

Species \ Value	1 st harmonic	Annual mean of absorption (t/ha/year)		coefficient(t/ha/year)	
	10yr mean	C	CO ₂	C	CO ₂
<i>Pinus densiflora</i> (Kangwon area)	0.1926	2.21	8.11	11.47	42.10
<i>Pinus densiflora</i> (Middle area)	0.1926	2.37	8.68	12.30	45.06
<i>Pines koraiensis</i>	0.2436	2.68	9.82	11.00	40.31
<i>Larix kaempferi</i>	0.2379	2.92	10.72	12.27	45.06
<i>Pinus rigida</i>	0.2298	2.53	9.26	11.00	40.29
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.1835	1.96	7.20	10.68	39.23
<i>Quercus acutissima</i>	0.2314	3.30	12.09	14.26	52.24
<i>Quercus mongolica</i>	0.2781	3.51	12.87	12.62	46.27

에서 호흡에 의해서 이산화탄소를 배출하고 남은 탄소가 나무에 축적되는 원리를 이용한 것이다. 따라서 나무가 1년간 성장한 양을 알면 여기에 수종별 탄소전환계수를 곱해서 탄소 무게를 환산함으로써 1년간의 이산화탄소 흡수량을 계산할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

1년에 걸쳐 식생지수의 변동을 나타내는 1차 하모닉 값은 식생에 의한 연간 이산화탄소 흡수량을 추정하는데 사용될 수 있고, 현장조사자료에 의해 측정된 참조자료와의 비교에 의해 검증되었다. 표본 자료를 이용하여 10년간의 MODIS 식생지수 자료의 퓨리에 분석을 통해 도출된 평균 1차 하모닉값과 실제 연간 이산화탄소 흡수량 자료와 비교하기 위해 우리나라 숲의 대부분을 차지하고 있는 임령인 30~40년생 수종을 대표하는 35년생을 이용하였다. 주요 수종별 10년 평균 1차 하모닉 값은 Table 3과 같고 남한지역의 주요 수종인 소나무와 신갈나무의 10년 평균 1차 하모닉 값은 각각 0.19, 0.28이

었다. 주요 수종별 10년 평균 1차 하모닉 값으로 나누어 계산한 비례상수 α 값은 침엽수와 활엽수로 구분되는 수종임에도 불구하고 소나무와 신갈나무의 이산화탄소 비례상수는 각각 45.06, 46.27로 수렴하였다.

현장조사자료의 탄소 흡수량에 대한 참조자료의 단위면적은 1 ha인데 비해 본 연구에서 사용된 MODIS 위성영상의 공간해상도는 1단위 해상도가 5.29 ha이다. 따라서 남한지역의 산림 탄소 흡수량을 추정하고 지도를 제작하기 위해서 Table 4에서는 MODIS 자료의 해상도에 맞게 2.3×2.3 ha 별 탄소 흡수량으로 조정하여 비례상수를 도출하였다. 1차 하모닉의 값이 임령별로 구분하여 도출된 것이 아니기 때문에 임령별로 차이를 보이고 있지만 남한 산림의 70%이상을 차지하고 있는 소나무와 신갈나무에서 대표적인 임령대인 30~60년생에서, 평균 비례상수 α 값은 236으로 수렴함을 보여주었다. 비교분석을 통해 계산된 비례상수는 식물 개개 종, 위치 및 환경에 의존적이지 않고 보편적 값을 보여주는 데 이것은 본 연구에서 제시한 시계열 식생지수의 프로파일에서 도출한 1차 하모닉값이 실제 식물 종의 연간

Table 4. Estimated α values(Unit: ton/5.29 ha/year)

Species \ Age(year)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
<i>Pinus densiflora</i> (Kangwon area)	206.3	218.3	220.5	226.1	226.1	226.1	222.2	222.2	218.3	214.1	210.2	202.4	198.2
<i>Pinus densiflora</i> (Middle area)	162.5	214.1	238.1	242.0	238.1	226.1	210.2	198.2	186.5	174.5	162.5	150.8	142.7
<i>Pines koraiensis</i>	240.8	261.7	269.6	273.7	273.7	269.6	265.6	261.7	257.8	253.9	245.9	242.0	238.1
<i>Larix kaempferi</i>	315.5	315.5	311.4	298.8	290.7	278.2	269.8	257.3	249.2	240.8	232.5	224.1	215.8
<i>Pinus rigida</i>	230.0	242.0	250.0	258.1	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3	262.3	258.1	254.2
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	210.7	207.4	204.0	200.7	197.4	197.4	193.7	193.7	190.4	190.4	190.4	190.4	187.0
<i>Quercus acutissima</i>	221.6	229.3	233.4	233.4	229.3	221.6	213.9	206.2	194.4	186.7	179.0	171.0	163.3
<i>Quercus mongolica</i>	299.6	279.9	264.1	248.5	236.5	220.8	209.1	201.2	189.2	181.5	173.6	165.6	157.7

Fig. 5. Map of the carbon dioxide absorption in South Korea, 10 years average(2000~2009)(CO₂ ton /5.29ha/year).

이산화탄소 흡수량과의 비례관계에서 식(8)에 의해 공식화된 방법이 매우 잘 적용된다는 것을 증명한다.

식생의 생물계절 특징이 뚜렷이 구분되는 소나무(상록침엽수림)와 신갈나무(낙엽활엽수림)의 비례상수 값이 하나의 지점으로 수렴하는 것은 본 연구의 가장 중요한 결과이다. 왜냐하면 식생지수로 도출된 영상의 반사값에 이러한 보편적 상관계수를 이용하여 산림면적을 적분함에 의해서 정량적으로 그리고 반복적으로 산림의 연간 이산화탄소 흡수량을 계산할 수 있다는 결론을 얻을 수 있기 때문이다. 이렇게 계산된 비례상수 값을 이용하여 식(9)와 같이 식생면적 S 를 적분함에 의해 이산화탄소에서 흡수된 전체 양(C_s)이 획득될 수 있다.

$$C_s = \alpha_s A_s \quad (9)$$

식(9)를 활용하여 산림지역에 대해 도출된 비례상수 값을 적분함으로써 남한 산림의 연간 이산화탄소 흡수량은 56,782,780톤이었다. 이러한 결과 값은 우리나라 연간 산림 이산화탄소 흡수량인 53,000,000톤(Korea Forest Service, 2010)과 근접한 결과로써 본 연구에서 제시한 방법이 타당함을 입증해준다. Fig. 5는 본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 남한 산림 전체에 대하여 계산한 10년 평균 연간 이산화탄소 흡수량 지도이다.

4. 결론

본 연구는 퓨리에 분석을 통해 도출된 시계열 식생지수 자료의 1차 하모닉 값을 1년 단위의 생육주기를 가지는 산림의 연간 이산화탄소 흡수량을 추정하는데 사용하기 위해 남한 산림의 주요 수종에서 측정된 연간 단위 면적(ha)당 표준 이산화탄소량 흡수량 현장조사와의 상관성을 분석하여 산림 수종에 상관없이 한반도 산림 면적 전체에 대하여 이산화탄소 흡수량을 정량적으로, 반복적으로 추정하고 지도화 하는 것이 가능함을 검증하였다. 이 방법은 시계열 MODIS 위성영상과 현장 관측치 자료를 연동하여 산림 수종에 상관없이 보편적인 비례상수를 도출하여 연간 산림 생산성을 추정하는 것인 간편하고 비용효율적인 방법임을 증명하였다. 이러한 결과는 지역의 연간 이산화탄소 흡수량을 추정하는 것뿐만 아니라 탄소량을 객관적으로 비교하는 데 유용한 방법이 될 수 있다. 이러한 산림 바이오매스 추정 방법은 합법적으로 교토의정서의 받아들여진 틀의 문맥에

서뿐만 아니라 탄소계산과 지속 가능한 산림 관리를 위해서 결정적인 정보를 제공할 수 있으므로, 본 연구에서 제시한 환경공간정보는 최근 이슈화되고 있는 A/R CDM, REDD 체제에 맞춘 온실가스 인벤토리 작성 및 환경정책수립에 크게 기여할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국연구재단 일반연구지원사업의 지원 (과제번호: 2012R1A1A2042181)으로 이루어졌습니다.

References

- Blackard, J.A., M.V. Finco, E.H. Helmer, G.R. Holden, M.L. Hoppus, D.M. Jacobs, A.J. Lister, G.G. Moisen, M.D. Nelson, R. Riemann, B. Ruefenacht, D. Salajanu, D.L. Weyermann, K.C. Winterberger, T.J. Brandeis, R.L. Czaplewski, R.E. McRoberts, P.L. Patterson, and R.P. Tymcio, 2008. Mapping U.S. forest biomass using nationwide forest inventory data and moderate resolution information, *Remote Sensing of Environment*, 112:1658-1677.
- DeFries, R., F. Achard, S. Brown, M. Herold, D. Murdiyarso, B. Schlamadinger, and C. de Souza, 2007. Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries, *Environmental Science and Policy*, 10(4):385-394.
- Fuchs, H., P. Magdon, C. Kleinn, and H. Flessa, 2009. Estimating aboveground carbon in a catchment of the Siberian forest tundra: combining satellite imagery and field inventory, *Remote Sensing of Environment*, 113(3):518 -531.
- Gibbs, H.K., S. Brown, J.O. Niles, and J.A. Foley, 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality, *Environmental Research Letters*, 2(4): 045023.
- Goetz S., A. Baccini, N. Laporte, T. Johns, W. Walker, J. Kelldorfer, R. A Houghton, and M. Sun, 2009. Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods, *Carbon Balance and Management*, 4(1): 2.
- Jakubauskas, M.E., D.R. Legates, and J.H. Kastens, 2002. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data, *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1): 127-139.
- Herold, M. and T. Johns, 2007. Linking requirements with capabilities for deforestation monitoring in the context of the UNFCCC-REDD process, *Environmental Research Letters*, 2(4): 045025.
- Huiyan, G., D. Limin, W. Gang, X. Dong, W. Shunzhong, and W. Hui, 2006. Estimation of forest volumes by integrating Landsat TM imagery and forest inventory data, *Science in China, Series E Technological Sciences*, 49(1): 54-62.
- IPCC, 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*, Institute for Global Environment Strategies.
- Niels, A. and J. Sathaye, 2008. Reducing deforestation and trading emissions: Economic implications for the post-Kyoto carbon market, *ZEW-Centre for European Economic Research Discussion Paper*, 08-016.
- Otsuka T., W. Mo, T. Satomura, M. Inatomi, and H. Koizumi, 2007. Biometric based carbon flux measurements and net ecosystem production (NEP) in a temperate deciduous broad-leaved forest beneath a flux tower, *Ecosystems*, 10: 324-334.
- Patenaude G., R. Milne, and T.P. Dawson, 2005. Synthesis of remote sensing approaches for forest carbon estimation: reporting to the Kyoto Protocol, *Environmental Science and Policy*, 8(2): 161-178.
- Rahman, M.M., E. Csaplovics, and B. Koch, 2008.

- Satellite estimation of forest carbon using regression models, *International Journal of Remote Sensing*, 29(23): 6917-6936.
- Reed, B.C., J.F. Brown, D. VanderZee, T.R. Loveland, J.W. Merchant, and D.O. Ohlen, 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery, *Journal of Vegetation Science*, 5(5): 703-714.
- Smith, B., W. Knorr, J.L. Widlowski, B. Pinty, and N. Gobron, 2008. Combining remote sensing data with process modelling to monitor boreal conifer forest carbon balances, *Forest Ecology and Management*, 255(12): 3985-3994.
- Son Y.M., K.H. Lee, and R.H. Kim, 2007. Estimation of Forest Biomass in Korea, *Journal of Korean Forestry Society*, 96(4): 477-482.
- Wulder, M.A., J.C. White, R.A. Fournier, J.E. Luther, and S. Magnussen, 2008. Spatially explicit large area biomass estimation: three approaches using forest inventory and remotely sensed imagery in a GIS, *Sensors*, 8:529-560.
- Wylie, B.K., D.J. Meyer, L.L. Tieszen, and S. Mannel, 2002. Satellite mapping of surface biophysical parameters at the biome scale over the North American grasslands - A case study, *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3): 266-278.
- Yim J.S., W.S. Han, J.H. Hwang, S.Y. Chung, H.K. Cho, and M.Y. Shin, 2009. Estimation of Forest Biomass based upon Satellite Data and National Forest Inventory Data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 25(4): 311-320.
- Ministry of Environment, 2007, <http://egis.me.go.kr/>
- Korea Forest Service, 2009, <http://www.forest.go.kr/>
- Korea Forest Service, 2010, <http://www.klaw.go.kr/>