MODIS NDVI 시계열 자료의 하모닉 분석을 통한 지표 식생 변화 탐지

정명희*† · 장은미**

안양대학교 디지털미디어공학과*, (주)지인컨설팅**

Land-Cover Vegetation Change Detection based on Harmonic Analysis of MODIS NDVI Time Series Data

Myunghee Jung* and Eunmi Chang**

Department of digital Media, Anyang University*, Ziinconsulting Inc. CEO**

Abstract : Harmonic analysis enables to characterize patterns of variation in MODIS NDVI time series data and track changes in ground vegetation cover. In harmonic analysis, a periodic phenomenon of time series data is decomposed into the sum of a series of sinusoidal waves and an additive term. Each wave is defined by an amplitude and a phase angle and accounts for the portion of variance of complex curve. In this study, harmonic analysis was explored to tract ground vegetation variation through time for land-cover vegetation change detection. The process also enables to reconstruct observed time series data including various noise components. Harmonic model was tested with simulation data to validate its performance. Then, the suggested change detection method was applied to MODIS NDVI time series data over the study period (2006-2012) for a selected test area located in the northern plateau of Korean peninsula. The results show that the proposed approach is potentially an effective way to understand the pattern of NDVI variation and detect the change for long-term monitoring of land cover.

Key Words : Vegetation index Change Detection, Harmonic analysis, MODIS NDVI

요약 : MODIS NDVI 시계열 자료에 하모닉 분석을 적용하면 계절에 따른 식생의 연간 변화 패턴을 이해할 수 있다. 하모닉 분석은 시간에 따라 형성된 시계열 자료의 복잡한 파형의 형태를 일련의 정현파 파형(sinusoidal waves)의 합으로 분해하고 진폭과 위상으로 정의되는 각 파형의 특성을 통해 시계열 자료의 패턴을 분석하는 방법이다. 본 논문은 NDVI 시계열 자료에 하모닉 모형을 적용하여 각 구성 성분의 진폭과 위상을 측정하고 이러한 파라미터들의 변화를 분류하여 식생의 연간 변화를 탐지하는 방법론을 제안하고 있다. 이를 통해 장기간에 걸친 식생 변화 지역을 모니터링할 수 있고 또한, 이 과정에서 하모닉 모형을 통해 미관측 자료나 노이즈 자료를 복원하여 시계열자료를 재구성할 수 있는 장점도 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션 자료를 통해 하모닉 분석의 유용성에 대해 테스트하였고, 2006년부터 2012년까지 총 7년간 북한 개마

접수일(2013년 5월 21일), 수정일(1차 : 2013년 6월 17일, 2차 : 7월 29일), 게재확정일(2013년 7월 30일).

† 교신저자: 정명희(mhjung@anyang.ac.kr)

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

고원 부근의 MODIS NDVI 식생 자료에 하모닉 모형을 적용하여 연간 변화 지역을 탐지하고 연간 식생변화 지역맵을 작성하였다. 이렇게 작성된 연간 식생변화지역맵은 장기적인 식생변화 모니터링을 위한 기초 맵으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

식생자원에 대한 정보는 산림 변화, 작물 수확량 모델링 및 예측, 작물의 시기별 현황 파악, 작물의 물 공급과 같은 여러 응용분야에서 활용되고 있는 중요한 정보다. 이러한 식생 자원에 대한 모니터링을 위해 위성영상들은 매우 유용한 정보원으로 활용되고 있는데 특히 넓은 지역에 대한 장기적인 식생자원 모니터링을 위해서는 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer), SPOT VEGETATION, MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)와 같이 높은 주기성을 가지고 있는 저해상도(250 m ~ 1000 m) 위성영상들이 유용하게 활용되고 있다.

이 중 MODIS는 36개 밴드를 가지고 250 m ~ 1 km의 다양한 공간해상도의 일일 글로벌 자료를 제공해 주는 장점으로 인해 여러 분야에서 유용하게 활용되고 있는 위성자료다. 또한, 표준 산출물로 보편적으로 활용되고 있는 식생지수인 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)와 EVI(Enhanced Vegetation Index)를 정규적으로 제공하고 있어 식생의 생물계절 모니터링, 산림 변화 탐지, 작물과 관련된 지표정보(Land use/land cover), 등의 응용 예제에서 식생지수를 이용한 다양한 분석 방법들이 개발되어 왔다(Jakubauskas *et al.*, 2001; Jiang *et al.*, 2010; Sakamoto *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2003).

현재 식생 현황을 파악하고 변화를 모니터링하기 위해서 통계적 방법, 푸리에 변환, 웨이블릿 등의 다양한 방법들이 활용되고 있다(Davis, 1986; Galford *et al.*, 2008; Jakubauskas *et al.*, 2001; Ma and Frank, 2006). 장시간에 걸쳐 관측되는 원격탐사 자료의 물리적 과정(Physical Processes)은 일반적으로 계절적 특성을 가진 시계열 경향을 나타내고 있어 자료를 분석할 때 이러한 특성이 고려되어야 한다. 이러한 측면에서 지표 변화와 관련된 정보를 획득하기 위해 시간 도메인에서 자료를 분석하는 것이 공간상이나 스펙트럼 상의 분석보다 계절적 변화, 연간 변화 양상에 대한 특징을 더 잘 보여준다고 평가되

고 있다(Bloomfield, 1976).

원격탐사 자료를 시간 도메인 상에서 분석하기 위한 방법으로 기본적인 PCA 분석에서부터 매트릭스 기법, 통계적 방법, 하모닉 분석, 웨이블릿 분석, 등 많은 방법이 제안되어 왔다(Box and Jenkins, 1976; Bruce and Mathur, 2005; Jiang, *et al.*, 2010; Sakamoto *et al.*, 2009; Ma and Frank, 2006; Pettorellia *et al.*, 2005). 이 중 수준, 주기, 진폭, 위상, 4가지 요소로 시계열 자료를 설명하는 하모닉 모형은 계절주기를 가진 시간적 변동성을 표현하기에 적합한 모형으로 각 화소에 대한 관측 값의 시계열 자료는 그 화소가 속한 클래스의 계절적 특징을 대표하는 하모닉 성분으로 정의될 수 있다(Doran and Quilkey, 1972; Jakubauskas *et al.*, 2001; Lee, 2009). 시계열 추상의 NDVI 자료는 식생의 계절적 변화 양상을 잘 나타내고 있으므로 하모닉 분석을 통해 이러한 생물 계절학적 변화 양상을 모형화하고 시계열 자료의 파형 변화를 감지하여 식생 변화를 탐지할 수 있다.

본 논문에서는 MODIS NDVI 시계열 자료를 이용하여 식생 변화를 탐하기 위해 하모닉 분석을 적용하는 방법론이 연구되었다. 하모닉 분석에서는 시계열 자료의 시간에 따라 형성된 복잡한 파형을 일련의 정현파 파형(Sinusoidal Wave)의 합으로 표현한다. 이때 각 정현파 구성 성분은 진폭(Amplitude)과 위상(Phase)으로 정의된다. 시계열 자료에 하모닉 분석을 적용하면 하모닉 구성 요소의 진폭과 위상이 측정되고 이 파라미터들의 특징을 이용하여 각 화소의 특징을 정의하거나 이 요소들의 변화를 기반으로 식생지수 변화를 추적할 수 있다.

먼저 각 화소마다 NDVI 시계열 자료의 연간 진폭과 위상을 측정하고 연간 변화를 계산하여 이를 통해 변화 지역을 분류해 낸다. 이때 각 하모닉 구성 요소마다 전체 파형에 대한 기여도가 다르기 때문에 본 논문에서는 이러한 점을 파형의 가중치로 고려하여 계산하였고 Mahalanobis Distance를 이용하여 변화/비변화 지역으로 분류하였다. 이렇게 탐지된 연간 변화 지역을 누적하여 장기간에 걸친 연간 변화지역맵을 작성해 갈 수 있다.

NDVI 시계열 자료를 분석할 때 가장 큰 문제는 자료 획득 시의 기상 조건, 데이터 전송, 대기 보정, 등의 문제로 인한 미관측 자료나 노이즈 자료다. 이러한 노이즈는 시계열 분석의 정확도를 떨어뜨리는 요인이 되기 때문에 자료를 분석하기 전에 재구축할 필요가 있다. 미관측 및 노이즈 자료 복원을 위해서 BISE(Best Index Slope Extraction)(Jonsson and Eklundh, 2002), Fourier 분석(Bruth and Mathur, 2002), MVC(Maximum Value Composite)(Lovell and Graetz, 2001), PoLeS(Polynomial Least-Squares)(Chappell *et al.*, 2002), AGF(Asymmetric Gaussian Fitting)(Ziang *et al.*, 2010), 웨이블릿(Woerink, 2000), 등과 같은 다양한 방법들이 제안되어 왔는데 하모닉 모형을 이용하면 연속적인 시계열 자료에서 미관측 자료와 노이즈 자료를 복구할 수 있는 장점도 있다(Lee, 2009).

제안된 분석 방법에 대해서는 시뮬레이션 자료를 이용하여 하모닉 모형의 적합성을 테스트하였고 실험지역으로 한반도의 대표적인 식생지역 중의 하나인 북부 개마고원 부근의 400 x 400 샘플지역을 선정하여 2006년부터 2012년까지 7년간 총 161개의 MODIS NDVI 시계열 자료에 하모닉 분석을 적용하고 그 유효성을 검증하고자 하였다. 테스트 지역 시계열 자료의 연간 진폭과 위상 파라미터를 측정하고 그 변화를 분류하여 연간 변화가 있는 지역을 탐지하였고 최종 식생변화지역맵을 작성하였다. 이렇게 작성된 맵은 테스트지역의 장기적인 식생변화를 모니터링하기 위한 기초 맵으로 활용될 수 있다.

2. 연구방법

1) 하모닉 분석

하모닉 분석(Harmonic analysis or Fourier analysis)은 복잡한 파형을 정현파 성분(Sinusoidal Component)의 합으로 나타내고 자료를 정현파와 비교하여 변이를 분석하는 방법이다(Broomfield, 1976; Doran and Quilkey, 1972). Fig. 1에서와 같이 일련의 정현파 파형의 합은 보다 복잡한 새로운 파형을 만들어 내는데 이 파형에 하모닉 분석을 적용하면 일련의 코사인 파형과 상수항의 합으로 나타낼 수 있다.

수학적으로 이를 간략히 설명하면 $[0, L]$ 사이의 연속 함수는 다음과 같이 Fourier series로 나타낼 수 있다.

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (\alpha_n \cos \omega_n t + \beta_n \sin \omega_n t) + \frac{1}{2} \alpha_0$$

where $\omega_n = \frac{2\pi n}{L}$ (1)

이때 Fourier series 계수인 α_n 와 β_n 는 $\sin$ 과 $\cos$ 의 직교 특성에 의해 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\alpha_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(t) \cos \omega_n t dt, \beta_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(t) \sin \omega_n t dt, n \geq 0$$
 (2)

여기서 $\beta_0 = 0$ 이고 $\frac{1}{2} \alpha_0 = \frac{1}{L} \int_0^L f(t) dt$ 이어서 함수 $f(t)$ 의 평균이 된다. 식 (1)은 다시 오른쪽 Fourier series i 번째 성분을 다음과 같이 재구성함으로써 코사인 성분의 합으로 나타낼 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} & \alpha_i \cos \omega_i t + \beta_i \sin \omega_i t \\ &= \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \left(\frac{\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}} \cos \omega_i t + \frac{\beta_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}} \sin \omega_i t \right) \\ &= \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2} (\cos \phi_i \cos \omega_i t + \sin \phi_i \sin \omega_i t) \\ &= \alpha_i \cos(\omega_i t - \phi_i) \end{aligned}$$
 (3)

여기서 $\alpha_i = \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}$ 는 벡터 $\langle \alpha_i, \beta_i \rangle$ 의 길이를 나타내고, $\phi_i = \arctan \frac{\beta_i}{\alpha_i}$ 는 벡터 $\langle \alpha_i, \beta_i \rangle$ 의 각도(방향)를 나타낸다. 이 변환을 이용하여 식 (1)을 다시 정의하면 $f(t)$ 는 다음과 같다.

$$f(t) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \cos(\omega_n t - \phi_n)$$
 (4)

이때 α_n 과 ϕ_n 은 각각 n 번째 코사인 성분의 진폭과 위상을 의미하는데 진폭은 파형 높이의 1/2을, 위상은 원점에서 파형의 최고점까지의 거리를 뜻한다. 이렇듯 하모닉 분석에서는 복잡한 파형을 일련의 코사인 파형과 상수항의 합으로 나타낼 수 있다. 상수항 α_0 은 NDVI 시계열 자료의 경우 분석기간에 대한 NDVI 평균값이고, 전체 파형의 각 구성 성분인 코사인 파형은 연중 변화 폭과 시기를 의미하는 진폭(Amplitude)과 위상(Phase)으로 정의되어 진다. α_n 과 ϕ_n 값을 구하기 위한 α_i 와 β_i 는 식 (2)에 대한 다음과 같은 trapezoidal 근사식에 의해 구할 수 있다(Jakubauskas *et al.*, 2001).

$$\int_0^L f(t) dt \approx \frac{\Delta t}{2} (f(0) + f(L) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} f(k \Delta t)), \Delta t = \frac{L}{n}$$
 (5)

Fig. 1. A curve produced by addition of two harmonic curves.

따라서 시계열 자료 $\{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}\}$ 의 시간 t 에서의 관측치를 다음과 같이 가정할 때,

$$x_t = s_t + e_t \quad (6)$$

e_t 는 잡음을 나타내고 s_t 는 식 (3)에 의해 일련의 코사인 파형과 평균값을 나타내는 상수항의 합으로 분석할 수 있게 된다.

$$s_t = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \cos(\omega n t - \phi_n)$$

2) 파형 성분의 상대적 비율

NDVI 시계열 자료를 식 (4)에 의해 정현파 파형 혹은 하모닉 성분의 합으로 나타낼 때 전체 시계열 자료의 변이(Variance)는 각 파형 변이의 합으로 다음과 같이 측정될 수 있다(Doran and Quilkey, 1972).

$$T_{\text{variance}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 / 2 \quad (7)$$

이때 α_i 는 i 번째 하모닉 성분의 진폭이고 n 은 분석에서 고려되는 성분의 개수이다. 즉, 각 성분의 상대적 변이는 전체 변이에 대한 각 성분 변이의 비율로 계산될 수 있다.

상대적 변이는 각 정현파 구성 성분이 전체 파형 패턴에 기여하는 정도를 의미하기 때문에 파형의 특징을 설명할 때 사용될 수 있고 분석시간 단축을 위해 상대적으로 변이가 낮은 파형의 경우는 분석에서 제외시킬 수 있다.

3) 하모닉 모형을 이용한 식생 변화 탐지

하모닉 분석에서는 식 (4)과 같은 구성 성분의 파라미

터들로 파형의 특징이 정의되기 때문에 이를 통해 각 화소의 NDVI 시계열 자료 특징을 설명할 수 있다. 또한, 각 화소에서 NDVI 시계열 자료의 하모닉 구성 성분 C 의 변화를 탐지함으로써 식생 변화를 탐지할 수 있다.

$$C = \begin{bmatrix} \alpha_0 & 0 \\ \alpha_1 & \phi_1 \\ \alpha_2 & \phi_2 \\ \vdots & \vdots \\ \alpha_n & \phi_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

미관측, 노이즈 자료로 인해 어느 특정 시점을 기준으로 하여 화소간 NDVI를 비교할 수 없고, 연간 변화의 관점에서 볼 때도 이런 변화에 대한 측정의 의미가 없기 때문에 식생 변화 탐지를 위해서는 시계열 자료의 파형 변화를 이용하는 것이 보다 적합하다(Jung *et al.*, 2012). 즉, 연도를 y 라고 표시할 때 C_y 와 C_{y-1} 사이의 파라미터 변화를 측정함으로써 전체 파형의 변화를 통한 연간 식생 변화를 탐지할 수 있다.

이때 상대적으로 전체 변이에 대한 기여도가 높은 성분만을 고려할 필요가 있다. 어느 파형 성분에서의 변화가 매우 크다 할지라도 전체 파형에 대한 기여도가 낮다면 이 파형 성분의 변화는 의미가 없고 오히려 분석의 정확도를 떨어뜨릴 수 있기 때문에 상대적 변이를 고려하여 분석하는 것이 더 적합하다. 상대적 변이를 고려한 구성 성분의 파라미터 C_{pv} 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$C_{pv} = V_p C = \begin{bmatrix} \alpha_0 & 0 \\ pv_1^* \alpha_1 & pv_1^* \phi_1 \\ pv_2^* \alpha_2 & pv_2^* \phi_2 \\ \vdots & \vdots \\ pv_n^* \alpha_n & pv_n^* \phi_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

where $V_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & pv_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & pv_n \end{bmatrix}$

연간 NDVI 값의 평균 변화는 $\alpha_{0,y}$ 와 $\alpha_{0,y-1}$ 사이의 변화를 보면 알 수 있고 unimodal 변화는 $(\alpha_{1,y}, \phi_{1,y})$ 와 $(\alpha_{1,y-1}, \phi_{1,y-1})$ 사이의 변화를 통해 이해할 수 있다. 유사하게 bimodal 변화는 $(\alpha_{2,y}, \phi_{2,y})$ 와 $(\alpha_{2,y-1}, \phi_{2,y-1})$ 사이의 변화를 보면 알 수 있다. 또한 한 파형 성분의 변화는 다른 파형 변화와 밀접하게 연결되어 있기 때문에 전체적으로 변화를 탐지하기 위해서는 다음과 같이 파라미터들의 차 행렬 D 를 구하고,

$$D_{y,y-1} = C_{pv,y} - C_{pv,y-1} \quad (10)$$

각 화소의 파형 성분의 변화 D 에 대해 Mahalanobis

Distance와 같은 방법을 이용하여 식생 변화가 있는 지역을 분류해 낸다. 두 지점 (x, y) 사이의 Mahalanobis Distance는 다음과 같이 계산된다.

$$d_{\text{mahalanobis}}(x, y) = \sqrt{(x-y)^T \Sigma^{-1}(x-y)} \quad (11)$$

3. 결 과

1) 파형 분석에 대한 하모닉 모형의 성능 평가

먼저 시뮬레이션을 이용하여 하모닉 분석의 성능을 평가해 보았다. Fig. 2 (a)에처럼 두 정현파 파형의 합을 이용하여 새로운 파형을 생성해 내었고 이렇게 생성된 파형에 노이즈를 가한 후 하모닉 분석을 적용하였다. Fig. 2 (b)에서는 노이즈 파형에 하모닉 모형을 적용한 결과가 원래 파형과 시각적으로 비교되어 있어 하모닉 모형의 fitting 정도를 확인해 볼 수 있다. 또한, Table 1에 원래 파형의 파라미터와 하모닉 모형의 파라미터를 수치적으로 비교해 보았다. 이러한 결과를 볼 때 하모닉 모형은 원 파형을 매우 유사하게 fitting할 수 있고 수치상으로도 측정된 파라미터 값이 원래의 값과 매우 유사함을 알 수 있다. 이를 통해 복잡한 파형을 정현파 파형의 합으로 모형화할 수 있는 하모닉 분석의 유용성을 확인해 볼 수 있다.

2) MODIS NDVI 시계열 자료에 대한 하모닉 모형의 적용

다음은 시계열 식생 자료로 NASA가 제공하는 MODIS/

Table 1. Comparison of harmonic parameters

	original value	estimated value
Amplitude(1)	1.5	1.44
Phase(1)	0	0.09
Amplitude(2)	2.0	1.98
Phase(2)	$1.57(\pi/2)$	1.53

Aqua vegetation indices 16-day L3 global 250 m SIN Grid(v005) (MYD13Q1)를 사용하여 하모닉 분석의 유용성을 평가하였다. MYD13Q1에는 NDVI와 EVI 두 식생 지수가 포함되어 있고 자료의 정확성에 관한 신뢰도와 질 평가 자료가 함께 제공되어 있다. MODIS NDVI 자료는 16일 동안의 일일 NDVI 자료를 이용하여 합성되어 연간 총 23개의 MYD13Q1 자료가 제공된다. 본 연구를 위해 2006년부터 2012년까지 7년간 총 161개의 NDVI 시계열 자료가 수집되었다. 사용된 모든 자료는 NASA가 제공하는 MODIS Tool을 사용하여 한반도를 커버하는 영상들을 타일링하고 Sinusoidal 투영체계에서 UTM Zone 52N 좌표체계로 변환되었다.

Fig. 3 (a), (c), (e)는 MODIS NDVI 시계열 자료 프로파일의 예제들을 보여주고 있다. (a)는 비교적 연간 변화가 있는 화소의 경우이고 (c)는 연간 변화가 거의 없는 예제이다. 반면 (e)의 경우는 변화가 매우 심하고 연간 변화 패턴도 정의하기가 어려운 경우이다. Fig. 3 (b), (d), (f)에는 시계열 예제 자료에 하모닉 분석을 적용하여 얻어진 프로파일이 원 자료와 비교되어 있어 하모닉 모형의 fitting 정도를 시각적으로 확인해 볼 수 있다. (a)와 (c)의 경우는 하모닉 분석을 통해 NDVI 프로파일이 비교적

(a)

(b)

Fig. 2. Simulation test of harmonic model (a) a curve produced by sum of two different sinusoidal waves (b) harmonic fitting to the noised curve of (a).

Fig. 3. Comparison of raw MODIS NDVI time series data and NDVI profile reconstructed through harmonic analysis: (a), (c) and (e) are raw NDVI profiles, (b), (d) and (f) are reconstructed NDVI profiles.

잘 모형화되는 것을 볼 수 있지만 (e)와 같이 자료의 변동이 심하고 일정한 패턴을 보이지 않는 경우는 장기적 패턴 변화를 관찰하는 것이 쉽지 않음을 알 수 있다. 이 경우 자료의 변동성이 심해 웨이블릿과 메디안 필터링을 적용해 보았는데 자료 보정 및 복원의 관점에서 볼 때 Fig. 4에서와 같이 하모닉 모형보다는 웨이블릿이 더 적합함을 알 수 있다. 그러나 장기적 식생 변화의 관점에서 보면 식생지역들은 Fig. 3의 (a), (c)와 같은 unimodal이나 bimodal 과 같은 연간 패턴을 보여주고 있어 식생변화 패턴과 자료 보정 및 복원을 동시에 고려할 때 하모닉 모형이 적합함을 알 수 있다.

Fig. 3(a)의 변화를 전반적으로 다시 살펴보면 Fig. 5(a)에서와 같이 연간 진폭이 감소 추세를 보이고 있어 식생이 약간씩 감소함을 알 수 있고 Fig. 5(b)에서는 하모닉 파라미터의 변화를 통해 2008년에서 2011년 사이에 변

Fig. 4. Comparison of results of harmonic analysis, wavelet filter and median filter applied to very changeable NDVI time series data.

화가 많이 있었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 5(c)에서처럼 변화가 가장 컸던 2009년과 2010년 NDVI 프로파일과 하모닉 분석 결과를 비교하여 차이를 좀 더 자세히 살펴볼 수 있다. 이렇듯 전반적인 NDVI 프로파일 비교를 통해 하모닉 분석이 NDVI 시계열 자료의 연간 패턴을 비

Fig. 5. Analysis of yearly variation of NDVI profile in Fig. 3(a): (a) comparison of amplitudes (b) comparison of yearly difference of amplitudes (c) comparison of NDVI profiles between 2009 and 2010.

Fig. 6. Comparison of yearly difference of amplitudes and phases obtained from harmonic analysis applied to the test area shown in Fig. 8(a).

Fig. 7. Distribution of the amplitude difference of each harmonic component.

교적 잘 설명함을 알 수 있고 장기적으로 식생 변화를 모니터링하기 위해 하모닉 모형이 유용하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있다.

다음은 한반도의 대표적 식생지역 중의 하나인 북부 개마고원 부근의 400×400 크기의 샘플지역을 선정하여 NDVI 시계열 자료에 하모닉 모형을 적용하고 연간 변화를 살펴보았다. 먼저, 샘플 지역의 연간 식생의 전반적인 증감 변화를 살펴보기 위해 진폭 변화를 본 결과 Fig. 6(a)와 같이 전반적으로 식생 변화가 매우 적은 것을 알 수 있고 식생의 최고점을 나타내는 위상의 경우에도 Fig. 6(b)와 같이 전반적으로 변화가 적어 식생의 계절적 변화 양상에서도 변화가 적은 것을 알 수 있다. 이때 진폭 및 위상 값은 섹션 2.2에서 설명된 상대적 비율을 고려하여 계산되었다.

다음은 화소 단위로 변화 지역을 탐지하기 위해 식 (10)과 같이 진폭과 위상에 대한 파라미터들의 차 행렬

D 를 구하여 변화지역을 분류하였다. 본 연구에서 사용된 샘플 지역의 경우 Fig. 7에서와 같이 파라미터의 차가 0값을 중심으로 정규분포를 보이고 분산도 매우 낮아 전반적으로 변화가 적은 것을 알 수 있다. D 에 대해 Mahalanobis distance를 이용한 분류를 통해 2006년부터 2012년 까지 총 7년간 연간 변화지역을 탐지한 최종 결과는 Fig. 8(b)에 있는 연간 식생변화지역맵으로 요약될 수 있다. 연간 변화가 있는 지역으로 탐지된 화소 개수와 면적은 Table 2에 정리되어 있다. 이를 통해 2006년부터 2012년까지 전반적으로 식생 변화가 적고 화소마다 일정한 연간 패턴을 보여주고 있는 가운데 2008년에서 2009년, 2011년에서 2012년 사이에 변화가 있다고 판단된 지역이 상대적으로 더 많은 것으로 분석해 볼 수 있다. 이를 바탕으로 분류된 각 변화 화소의 경우 화소의 하모닉 모형 분석에 따른 진폭과 위상 변화를 통해 보다 상세히 변화과정을 살펴보는 것이 가능하다.

Fig. 8. Result of pixel-based NDVI change detection obtained from harmonic analysis applied to a sample area located in northern Korea: (a) a 400x400 subset area in northern Korean plateau region (b) NDVI change detection map during the years of 2006 through 2012.

Table 2. Number of pixels detected as change and their total area

Difference	Number of pixels	Area(km ²)
2007-2006	860	53.75
2008-2007	932	58.25
2009-2008	1403	87.69
2010-2009	967	60.44
2011-2010	1028	64.25
2012-2011	1319	82.44

4. 결론

화소대 화소 비교에 기반을 둔 방법으로는 화소 단위로 지표의 연간 식생 변화를 추정할 수는 없기 때문에 연간 시계열 패턴을 분석해서 변화를 탐지하는 것이 적합한 방법이다. 본 논문에서는 하모닉 분석을 이용해 MODIS NDVI 관측 자료를 복원하면서도 NDVI 시계열 자료의 연간 생물계절학적 변화 양상(연간 시계열 패턴)에서 일어나는 변화를 탐지하여 장기간으로 식생 변화를 모니터링할 수 있는 방법론이 제안되어 있다.

하모닉 분석은 계절적 변화나 장기적으로 NDVI 프로파일의 변화를 탐지할 수 있을 뿐만 아니라 자료 획득 시 발생하는 미관측이나 관측자료 오류 문제도 적응과정을 통해 추정할 수 있게 해주는 장점을 가지고 있다. 복잡한 파형을 정형파 파형 성분으로 분석하는 하모닉 분석은 구성 파형의 진폭과 위상 파라미터를 통해 시계

열의 파형 특징을 모형화하는 방법으로 대부분의 위성 자료의 경우 2~3개 정도의 파형 성분으로 분석이 가능하다(Jakubauskas *et al.*, 2001). 이러한 파형의 상대적 중요도는 각 구성 성분이 전체 파형에 기여하는 정도에 대한 비율로 결정될 수 있는데 이러한 상대적 비율은 분석 과정에서 고려되어야 한다.

자료의 변화가 매우 심한 경우 자료 복원을 위해서 하모닉 모형보다는 웨이블릿과 같은 방법이 보다 효과적일 수 있지만 산림이나 농지와 같은 식생 지역의 경우는 자료상의 오류가 있다하더라도 일정한 연간 패턴을 보여주고 있어 장기적인 시계열자료의 프로파일 변화라는 관점에서 하모닉 모형이 보다 더 적합하다고 할 수 있다.

본 연구에서 사용된 한반도 북부지역 예제의 경우는 2006년에서 2012년 사이에 전반적으로 일정한 연간 패턴을 보여주며 변화가 비교적 적은 편이었다. 제안된 분석 방법을 한반도 전 지역에 적용하면 장기적 관점에서의 한반도 전반의 식생변화를 이해할 수 있는 연간 식생 변화지역맵을 작성할 수 있고 변화지역으로 탐지된 경우 변화 양상을 보다 상세히 분류해 볼 수 있다. 변화는 단지 식생의 양이 줄어든 경우도 있지만 파형의 변화를 통해 식생이 있는 지표의 사용용도가 변경된 경우도 분류해 낼 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 안식년 기간중에 연구되었습니다.

Reference

- Box, G., and G. Jenkins, 1976. Time series analysis forecasting and control, *Prentice-Hall Englewood Cliffs*, New Jersey, USA.
- Bloomfield, P., 1976. *Fourier Analysis of Time Series: An Introduction*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- Bradley, B., R. Jacob, J. Hermance, and J.F. Mustard, 2007. A curve-fitting technique to derive inter-annual phonologies from time series of noisy NDVI satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 106: 137-145.
- Bruce, L.M. and A. Mathur, 2005. Denoising and wavelet-based feature extraction of MODIS multi-temporal vegetation signatures, *Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images, 2005 International Workshop*, pp.95-98.
- Chappell, A., J.W. Seaquist and L. Eklundh, 2001. Improving the estimation of noise from NOAA AVHRR NDVI for Africa using geostatistics, *International Journal of Remote Sensing*, 22(6): 1067-1080.
- Davis, J.C., 1986. Statistics and Data Analysis in Geology, 2nd Edition, J. Wiley and Sons, New York, NY, USA.
- Doran, H.E. and J.J. Quilkey, 1972. Harmonic Analysis of Seasonal Data: Some Important Properties, *American Journal of Agricultural Economics*, 54(4): 646-651.
- Galford, G.L., J.F. Mustard, J. Melillo, A. Gendrin, C.C. Cerri, and C.E.P. Cerri, 2008. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil, *Remote Sensing of Environment*, 112: 576-587.
- Jakubauskas, E. Mark, D.R. Legates, and J.H. Kastens, 2001. Harmonic Analysis of Time-Series AVHRR NDVI Data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(4): 461-470.
- Jiang, Bo, S. Liang, J. Wang and Z. Xiao, 2010. Modeling MODIS LAI time series using three statistical methods, *Remote Sensing of Environment*, 114: 1432-1444.
- Jonsson, P. and L. Eklundh, 2002. Seasonality extraction by function fitting to time series of satellite sensor data, *IEEE Trans. of Geoscience Remote Sensing*, 40(8): 1824-1832.
- Jung, M.H., S.H. Lee, E.M. Chang, S.W. Hong, 2012. Method of Monitoring Forest Vegetation Change based on Change of MODIS NDVI Time Series Pattern, *Journal of Korea Spatial Information Society*, 20(4): 47-55 (in Korean with English abstract)
- Lee, S.H., 2009. Adaptive Reconstruction NDVI Image Times Series for Monitoring Vegetation Changes, *Korean Journal of Remote Sensing*, 25(2): 95-105 (in Korean with English abstract)
- Lovell, J.L. and R.D. Graetz, 2001. Filtering pathfinder AVHRR Land NDVI data for Australia, *International Journal of Remote Sensing*, 22(13): 2649-2654.
- Ma, Mingguo and F. Veroustraete, 2006. Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI time-series data for the Northwest of China, *Advances in Space Research*, 37: 835-840.
- Pettorellia, N., J.O. Vika, A. Mysteruda, J. Gaillardb, C.J. Tuckerc and N.C. Stensetha, 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change, *Trends in Ecology and Evolution*, 20(9): 503-510.
- Roerink, G., M. Menenti and W. Verhoef, 2000. Reconstructing cloud free NDVI composites using Fourier analysis of time series, *International Journal of Remote Sensing*, 21(9): 1091-1108.

- 1911-1917.
- Sakamoto, T., M. Yokozawa, H. Toritani, M. Shibayama, N. Ishitsuka, H. Ohno, 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 96: 366-374.
- Zhang, X., M.A. Friedl, C.B. Schaaf, A.H. Strahler, J.C.F. Hodges, F. Gao, B.C. Reedb and A. Huete, 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 471-475.