

산지토양의 탄소와 질소 예측을 위한 가시 근적외선 분광반사특성 분석의 전처리 방법 비교

정관용*

Evaluating Spectral Preprocessing Methods for Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy to Predict Soil Carbon and Nitrogen in Mountainous Areas

Gwanyong Jeong*

요약 : 토양 예측은 지속가능한 산지관리 측면에서 필요한 토양특성자료를 제공할 수 있다. 이중 가시 근적외선 분광반사 특성을 이용한 토양 예측은 저비용, 빠른 분석과 비파괴 측정, 비교적 높은 정확도로 관심을 받고 있다. 일반적으로 토양 분광반사특성 측정 과정에서 잡음이 나타날 수 있어 전처리 과정이 필요하다. 하지만 이러한 전처리 방법을 비교하고 평가하는 작업이 거의 이루어지지 못 했다. 본 연구에서는 토양 탄소와 질소 예측을 위해 5가지 전처리 방법을 비교하였다. 이는 연속체 제거, Savitzky-Golay 변환, 이산 웨이블릿(wavelet) 변환, 1차와 2차 도함수 변환이다. 토양예측 모델로 부분 최소제곱 회귀모형을 사용하였고, 총 153개 시료 중에서 검증을 위해 122개 훈련자료와 31개의 검증자료로 나누어 평가하였다. 전반적으로 토양시료의 탄소 함량이 높을수록 토양에 대한 입사 에너지의 흡수가 커지는 특성을 보였다. 파장별로는 가시광선 영역(650nm와 700nm)이 토양 탄소 그리고 질소와 가장 높은 상관관계를 보였다. 전처리 비교에서 연속체 제거가 토양 탄소(9.53mg/g)와 질소(0.79mg/g)에 대해 가장 높은 정확도(Root Mean Square Error)를 보였다. 따라서 토양 탄소와 질소 예측을 위해 연속체 제거가 가장 효과적인 분광반사특성 분석의 전처리 방법으로 판단되었다. 시각적인 평가에서 웨이블릿 변환이나 Savitzky-Golay 변환은 차이가 거의 없었고, 평가 결과도 유사했다. 따라서 다소 계산과정이 간단한 Savitzky-Golay 변환이 선호될 수 있다.

주요어 : 가시 근적외선 분광반사특성, 전처리, 탄소, 질소, 산지토양

Abstract : The soil prediction can provide quantitative soil information for sustainable mountainous ecosystem management. Visible near infrared spectroscopy, one of soil prediction methods, has been applied to predict several soil properties with effective costs, rapid and nondestructive analysis, and satisfactory accuracy. Spectral preprocessing is an essential procedure to correct noisy spectra for visible near infrared spectroscopy. However, there are no attempts to evaluate various spectral preprocessing methods. We tested 5 different pretreatments, namely continuum removal, Savitzky-Golay filter, discrete wavelet transform, 1st derivative, and 2nd derivative to predict soil carbon(C) and nitrogen(N). Partial least squares regression was used for the prediction method. The total of 153 soil samples was split into 122 samples for calibration and 31 samples for validation. In the all range, absorption was increased with increasing C contents. Specifically, the visible

이 연구는 독일연구재단(German Research Foundation)의 지원을 받아 산악복합지형과 생태적 이질성(TERRECO)과제의 하나로 독일 바이로이트 대학에서 진행되었습니다.

* 바이로이트대학 지구과학과 박사(PhD, Department of Geosciences, University of Bayreuth), Gwanyong.Jeong@uni-bayreuth.de

region (650nm and 700nm) showed high values of the correlation coefficient with soil C and N contents. For spectral preprocessing methods, continuum removal had the highest prediction accuracy(Root Mean Square Error) for C(9.53mg/g) and N(0.79mg/g). Therefore, continuum removal was selected as the best preprocessing method. Additionally, there were no distinct differences between Savitzky-Golay filter and discrete wavelet transform for visual assessment and the methods showed similar validation results. According to the results, we also recommended Savitzky-Golay filter that is a simple pre-treatment with continuum removal.

Key Words : visible and near infrared reflectance spectroscopy, spectral preprocessing, soil carbon, nitrogen, mountain soils

1. 서론

토양은 모든 식생과 생명체에 영양분을 공급하는 필수적 환경요소이다. 그 중에서 탄소와 질소는 중요한 토양특성으로 여겨진다. 탄소는 유기물의 주요한 구성성분이며, 이는 용적밀도, 토양 수분 함량, 양이온교환용량 등과 밀접한 관련성을 가지고 있어 토양의 질에서 가장 중요한 변수로 언급되었다(Schoenholtz *et al.*, 2000). 토양 탄소는 또한 대기 중의 이산화탄소의 농도에 영향을 주어 장기적으로 기후변화와 관련하여 중요한 조절자로 관심을 받고 있다(Lal, 2004). 질소는 식생 생장에 가장 많이 요구되는 필수 영양성분으로 비료에 주요 성분이다. 일반적으로 육지 생태계에서 질소는 가장 중요한 생장 제한 요인이다(Vitousek *et al.*, 2002). 따라서 토양 탄소와 질소는 생태계 이해를 위한 필수적인 환경자료이다.

토양자료는 기본 환경자료로서 산지관리나 수자원 관리, 환경평가를 위해 사용될 수 있다. 또한 지속가능한 생태계 관리를 위해 환경모형을 이용하여 다양한 정책적 시나리오에 대한 평가가 필요하며, 이러한 환경모형들은 탄소와 질소 같은 토양특성에 대한 입력 자료를 요구하고 있다(Shukra, 2011). 하지만 현재 토양도는 이에 필요한 고해상도의 양적 정보를 제공할 수 없다. 부족한 정보를 위해 추가적인 토양분석과 현장조사가 필요하며, 따라서 많은 비용과 노력이 요구된다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방안으로 토양 예측 분야가 발달하게 되었다(Scull *et al.*, 2003). 이는 일반적으로 토양과 환경요인의 상관관계를 바탕으로 토양예측을 실시한다(McBratney *et al.*, 2003).

국내에서도 환경상관관계방식(Park *et al.*, 2009; 박수진 등, 2010; 정관용, 2011)과 지형분류방식(정관용·박수진, 2015)을 이용하여 토양 예측가능성을 살펴본 연구들이 있었다. 이러한 방식 외에도 원격탐사를 이용한 토양예측이 있으며, 이는 토성이나 수분함량, 유기물함량 등을 직접적으로 예측하여 토양특성 정보를 제공할 수 있다(Scull *et al.*, 2003). 또한 시계열적인 위성영상 이미지를 이용하여 연속적인 시공간 자료구축이 가능하게 되었다. 하지만 대기와 지표 식생, 다른 토양특성의 영향으로 직접적인 예측의 어려움이 있다.

분광반사특성을 이용한 토양예측은 원격탐사의 한 분야로 실험실이라는 제한된 공간에서 분석을 실시하기 때문에 한계에서 자유로울 수 있다(Soriano-Disla *et al.*, 2014). 분광반사특성 분석은 최소 비용, 빠른 작업시간, 비파괴 측정, 그리고 만족스러운 정확성으로 토양 특성을 예측할 수 있다는 것을 보여주었다(Rossel *et al.*, 2010a). 분광반사특성은 탄소, 식생 영양분, 토성, 토양 광물, pH, 토양 수분 등 다양한 토양예측에 사용되었다(Stenberg *et al.*, 2010). 이러한 분석은 시료 표면에 빛을 방사한 후, 반사되는 에너지의 강도를 파장별로 측정하고, 에너지 흡수특성에 따라 구성물질을 정성적, 정량적으로 측정할 수 있는 기법이다(박형동 등, 2011). 흡수특성은 주로 함유된 토양광물 그리고 유기물질과 관련이 깊은 것으로 알려져 있다(Rossel *et al.*, 2006).

분광반사특성 분석은 시료 측정, 전처리, 모델 훈련, 예측 그리고 평가라는 과정으로 구성된다. 시료 측정은 실험실에서 다양한 토양특성을 분석하고, 분

광계를 이용하여 토양의 분광반사특성을 측정하는 단계이다. 전처리는 분광반사특성의 잡음을 제거하거나 개선하는 단계이다. 모델 훈련은 다양한 토양특성과 분광반사특성 사이에 관계를 파악하고 이를 통해 모델을 훈련하는 과정이다. 이 과정에서 얻어진 모델을 이용하여 새로운 분광반사특성의 다양한 토양특성을 예측하게 된다. 마지막으로 검증 자료를 이용하여 예측결과를 평가하게 된다.

특히, 전처리는 가시 근적외선 분광반사특성의 유용한 정보를 강조하고, 잡음을 줄여서 토양예측의 정확도를 높이는데 필수적인 단계이다. 이는 기계에서 나타나는 오류제거와 반사도 자체 잡음을 개선하는 작업으로 구분할 수 있다. 우선 기계에서 반사도를 측정할 때 분광계는 3가지 센서를 사용한다. 각 센서가 측정하는 스펙트럼의 범위가 다르며 하나의 센서에서 다른 센서로 바뀔 때 급격한 차이가 결과로 나타날 수 있다. 또한 측정 시 처음 부분과 마지막 부분인 양쪽 가장자리에서 급격한 변동 값이 나타나기도 한다. 따라서 측정값의 안정성을 확보하기 위해 이를 제거하거나 개선하는 절차가 필요하다. 다음으로 잡음을 개선하기 위해 가시 근적외선 반사도를 평활화(smoothing)하는 작업을 실시하여야 한다. 평활화 작업에 대한 특정 방법은 없으며 각 토양의 특성에 따라 다르게 적용하게 된다(Stenberg and Rossel, 2010). 주로 사용하는 방법으로는 연속체 제거(continuum removal, CR), Savitzky-Golay 변환, 이산 웨이블릿 변환(discrete wavelet transform), 1차 도함수, 2차 도함수 변환 등이 있다(Stenberg and Rossel, 2010). 분광반사특성 분석에서 전처리 과정은 정확한 분석을 위해 필수적인 단계임에도 불구하고 이를 비교하고 평가하는 연구는 거의 없었다.

국내에서도 분광반사특성을 이용한 토양예측에 대한 몇 가지 연구들이 있었지만 산지토양에 대한 연구는 없었다(최은영 등, 2009; 2010; Chun *et al.*, 2012; Hong *et al.*, 2014). 연구지역인 강원도 소양강 유역은 산지복잡지형경관으로 경사가 급하고 지표의 굴곡이 심하다(강신규·Tenhunen, 2010). 또한 북한과 인접하여 지뢰나 군사지역 때문에 접근성이 떨어지며, 토양자료를 구득하기 어려워 새로운 조사가 필요한 실

정이다. 이러한 분광반사특성을 이용할 경우 대량의 양적인 자료를 저비용으로 빠른 시간에 구축이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 산지토양을 대상으로 탄소와 질소 예측을 위한 효과적인 분광반사특성 전처리 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 우선 토양 탄소, 질소와 상관성이 높은 분광반사특성의 파장을 찾았다. 다음으로 다양한 전처리 방법에 따른 예측모델을 구축하고, 이를 이용하여 토양 탄소와 질소를 예측하고 평가하였다.

2. 연구방법

1) 연구지역

연구지역은 강원도 소양강 유역 일대의 산림지역으로 한정하였다(그림 1). 소양강 유역은 행정구역 상 강원도 양구군, 인제군, 춘천시에 속하며, 2,776km²의 면적을 보인다. 소양강은 무산에서 발원하며, 설악산과 오대산 국립공원을 포함한다. 고도는 70에서 1,700m에 이르며, 연강수량은 1,179mm이다. 유역의 80%가 산림으로 이루어져 있으며, 그 중 52%가 활엽수이다. 지질은 호상 편마암과 화강암으로 이루어져 있다. 이 지역의 산림은 대부분이 군사지역이나 수자원보호구역, 자연보호지역으로 지정되어 상대적으로 인간의 간섭이 적어 본 연구에 적합한 지역으로 판단된다. 또한 연구지역은 경사가 급하고 다양한 지형이 나타나는 산지지역이며, 따라서 우리나라 산지의 일반적인 특성을 잘 반영하고 있어 향후 다른 연구에서 적용가능성이 높을 것으로 판단된다.

2) 토양자료와 분광특성 측정

총 118개 지점에서 토양층별 시료를 채취하였다. 공간적으로 연구지역을 대표하는 토양특성을 얻기 위하여 층화임의 추출 방법 중 하나인 조건부 라틴하이퍼 큐브 추출방법(conditioned latin hypercube

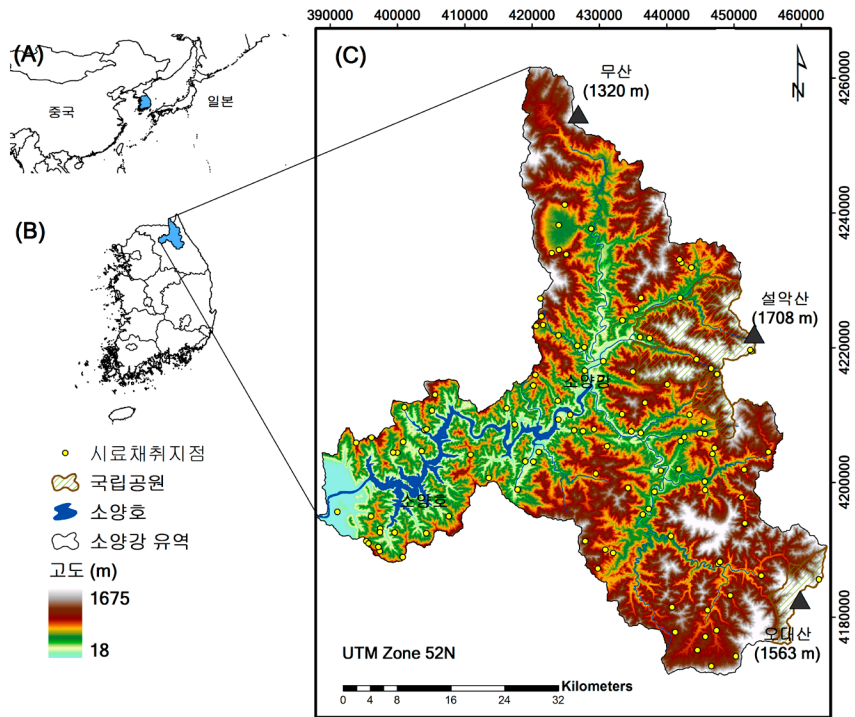


그림 1. 연구지역 (A) 동아시아 일대, (B) 대한민국, (C) 소양강 유역과 시료채취지점

sampling)을 사용하였다(Minasny and McBratney, 2006). 라틴 하이퍼 큐브 추출방법은 표본 수에 따라 각 환경변수의 확률밀도함수를 나누고, 각 범위마다 하나의 임의표본을 추출한 뒤, 모든 환경변수에서 추출된 임의표본들을 결합하는 방식이다(McKay *et al.*, 1979). 하지만 통계공간이 아닌 현실에서 표본을 추출할 수 없는 경우 조건을 주어 다시 추출하게 하는 방식이 조건부 라틴 하이퍼 큐브 추출방법이다(Minasny and McBratney, 2006). 다시 말해서, 지리적 공간이 아닌 환경변수의 통계적 공간을 일정하게 나눈 뒤, 각 범위 안에서 표본을 추출하여 결합하는 방식이다. 따라서 각 환경변수 값의 범위에서 고르게 표본을 채취할 수 있어 효과적인 통계분석이 가능하다. 표본 추출을 위해 R 패키지 “dhs”(Minasny and McBratney, 2006)를 사용하였다. 시료는 2013년 4월 중순부터 8월 초까지 채취하였다. 토양 시료 채취 후 바로 풍건하고 2mm 체에 통과 시켰다. 시료에서 토양층에 상관없이 153개를 무작위로 선택한 후 탄소와

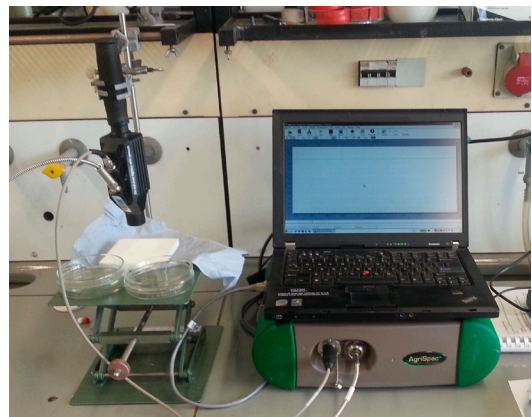


그림 2. 토양 분광특성 측정기기(ASD FieldSpec PRO)

질소 함량을 분석하였다. 탄소와 질소분석을 위해 곱게 갈아 놓은 시료를 고온에서 가열하고, 원소함량을 측정하는 CN analyzer를 이용하여 측정하였다.

분광특성분석을 위해 토양시료를 분석접시에 담은 후에 ASD FieldSpec PRO(Agrispec portable spec-

trometer)를 이용하여 분광 반사율을 측정하였다(그림 2). 기계의 측정 범위는 350~2,500nm이며, 1nm 단위로 측정이 가능하다. 측정을 위해 기기에 장착된 할로겐 램프를 이용하였고 측정값을 보정하기 위해 10회 측정 마다 spectralon diffuse reflectance panel을 이용하였다. 분광특성의 오류를 최소화하기 위해서 측정 시마다 30회 반복하였고, 분석접시에서 측정 지점을 옮겨가면서 이를 다시 5회 반복한 뒤에 최종적으로 평균한 값을 사용하였다.

3) 분광특성 전처리 방법

본 연구에서는 전처리에 따른 차이를 알아보기 위해 5가지 변환을 실시하였다. 우선 수식 1에 따라 전처리를 위해 반사도를 흡광도로 변환하였다. 연속체 제거를 제외하고 모든 변환에 흡광도 값을 이용하였다.

$$A = \log\left(\frac{1}{R}\right) \quad (1)$$

A: 흡광도, R: 반사도 값, log: 상용로그

연속체 제거는 물질의 고유한 흡수 형태를 추출하기 위해서 연속체 성분을 제거하는 과정이다. 이는 측정된 분광 반사율 곡선에서 국지적 최솟값만을 연결하여 연속체 부분을 만들고 다시 반사율 값을 연속체 값으로 나누어 계산한다(수식 2)(Clark and Roush, 1984).

$$CR = R_b / R_c \quad (2)$$

R_b: 반사도 값, R_c: 연속체 성분의 값으로 R_b와 동일한 파장에서 추출된 값

Savitzky-Golay 필터는 평균 필터(moving average filters)와 유사한 방법이지만 평균값을 이용하여 평활화하지 않고 다항함수를 이용하여 측정값의 잡음을 평활화하는 방법이다(Savitzky and Golay, 1964). 다시 말해서, 결과는 이웃한 값들의 가중 평균으로 볼 수 있다. 따라서 각 다항함수에서 몇 개의 값을 이용하여 계산할 것인가를 미리 정해야 하는데 이를 위해

이웃한 값의 범위와 다항함수의 종류를 설정해야 한다. 본 연구에서는 3차 다항함수를 이용하였으며, 11개의 값을 중심으로 평활화하였다(수식 3).

$$SG = \frac{1}{N} \sum_{b=-k}^k c_b X_{j+b} \quad (3)$$

N: 정규화 계수(normalizing coefficient), k: j를 중심으로 이웃한 값의 범위, c_i: 다항식에 적합시킨 계수

이산 웨이블릿 변환은 입력 자료를 특정 기본함수(basis function)의 집합으로 분해하여 표현하는 방법이다(Akansu *et al.*, 2001). 웨이블릿은 신호처리나 영상압축 분야에서 많이 사용되며 기본함수를 다양한 압축계수(scale)에 따라서 분류하기 때문에 정보 손실이 거의 없다(Rossel and Lark, 2009). 영상압축과는 달리 웨이블릿을 잡음 제거 목적으로 사용하기 위해서는 어느 정도까지를 잡음으로 볼 것인가 판단하는 과정이 필요하다. 특정 임계치(λ) 이하는 잡음으로 판단하고 버리며, 반대로 임계치 이상만을 이용하여 원래의 반사율을 웨이블릿 계수를 이용하여 재구성한다. 웨이블릿 변환을 위해 기본함수로 Daubechies 웨이블릿을 이용하였고 Donoho and Johnstone(1994)가 제시한 방법을 이용하여 임계치를 설정하였다(수식 4).

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log n} \quad (4)$$

σ: 잡음의 수준으로 자료의 중앙값을 사용, n: 자료의 수, log: 상용로그

각 전처리에 대한 장점과 한계를 표 1에 제시하였다. 모든 분석은 오픈소스 프로그램인 R에서 수행하였으며 연속체 제거, Savitzky-Golay, 1차 도함수, 2차 도함수 변환을 위해 패키지 “prospectr”(Ramirez-Lopez and Stevens, 2014)과 웨이블릿 변환을 위해 패키지 “WaveThresh”(Nason, 2008)를 이용하였다. 본 연구에서는 잡음이 많은 처음부분과 마지막 부분을 제거하기 위해 401nm에서 2,448nm까지 분석에 사용하였다.

표 1. 사용된 전처리 방식의 장점과 한계

	장점	한계
연속체 제거	고유하고 특징적인 흡수 패턴 추출, 작은 흡수 패턴 강조	노이즈 증가, 지나친 강조로 해석의 어려움
Savitzky-Golay	효과적으로 노이즈 제거, 수학적으로 간단	센서 차이에서 오는 노이즈 제거가 안될 수 있음
웨이블렛	효과적인 평활화 및 압축, 로버스트한 방법	분석과정이 다소 복잡함
도함수 변환	센서 차이에서 오는 노이즈 감소, 작은 흡수 패턴 강조, 가끔 복잡한 자료에서 정확도 증가	노이즈 강조, 해석의 어려움, 모델 과적합의 위험

출처: Stenberg *et al.* (2010); Stenberg and Rossel(2010)에서 인용하여 정리

4) 토양 예측 모델과 검증

토양 탄소와 질소의 예측을 위하여 부분 최소제곱 회귀모형(partial least squares regression)을 사용하였다. 부분 최소제곱 회귀모형은 Wold *et al.* (1984)에 의해서 개발되었으며 분광 반사율을 이용하여 양적인 연구를 수행하는 Chemometrics 분야에서 가장 많이 사용이 되었다(Rossel *et al.*, 2006; Stenberg *et al.*, 2010; Soriano-Disla *et al.*, 2014). 따라서 예측모델로 전처리 기법을 비교하기 위해 가장 적절한 방법이라고 판단하였다. 부분 최소제곱 회귀모형은 주성분 회귀모형(principal components regression)과 관련성이 깊다. 두 방법은 일반적으로 가시 근적외선 분광반사 특성 분석과 같이 반응변수보다 설명변수가 많고 설명변수 간 다중공선성(multicollinearity)을 보일 경우 유용하다. 두 방법 모두 선형 회귀모형을 만들기 전에 설명변수에서 잠재요인(component)을 추출하여 자료를 축소하는 작업을 실시한다. 하지만 설명변수의 분산만을 이용하여 요인을 만드는 주성분 회귀모형과 달리 부분 최소제곱 회귀모형은 요인 추출과정과 회귀모형을 만드는 과정을 통합하여 설명변수와 반응변수 사이에 공분산을 최대로 만드는 요인을 선택한다. 다시 말해서, 분광 반사율 값을 몇 가지 잠재요인으로 축소하면서 동시에 잠재요인과 토양특성의 관계를 고려하여 회귀모형을 만든다.

부분 최소제곱 회귀모형의 잠재요인의 수는 교차 검증(cross validation)을 통해서 선택되며, 이는 설명변수와 반응변수의 분산을 최대로 설명할 수 있는 요인을 찾는 과정이라 할 수 있다. 부분 최소제곱 회귀

모형은 오픈소스 프로그램인 R에서 분석하였으며 “pls”패키지(Dayal and MacGregor, 1997)를 이용하였다. 예측모델 평가를 위해 153개 자료를 122개 훈련 자료와 31개 검증자료로 나누었다. 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE)와 결정계수(R^2)를 평가기준으로 사용하였다.

3. 결과

1) 토양자료의 기술적 통계

본 연구에서 사용한 토양 탄소와 질소에 대한 기술 통계량은 그림 3과 표 2이다. 탄소와 질소는 대체적으로 로그정규분포를 보이고 있다. 유기물 함량은 평균이 29.05mg/g이며 범위는 0.89에서 95.1mg/g으로 나타났다. 정진현 등(2002)은 강원도지역 산림토양을 대상으로 A층과 B층 화학분석 자료를 제시하였다. 평균 탄소함량의 경우 A층은 28.09mg/g과 B층은 13.52mg/g였다. 본 연구에서 사용된 자료는 A층과 B층이 혼합되어, 20.81mg/g는 약간 높거나 유사한 결과이다. 질소의 경우 평균이 2.28mg/g이며 범위는 0.3에서 7mg/g으로 나타났다. 강원도 지역 평균 전질소 함량이 A층 2.1mg/g, B층 1.1mg/g으로 제시되었다. 따라서 2.28mg/g은 기존 연구와 비교했을 때 약간 높은 것으로 보인다.

기존의 연구에서 토양 탄소와 질소에 중요한 역할을 했던 반사도 파장을 선택한 뒤 피어슨 상관분석을

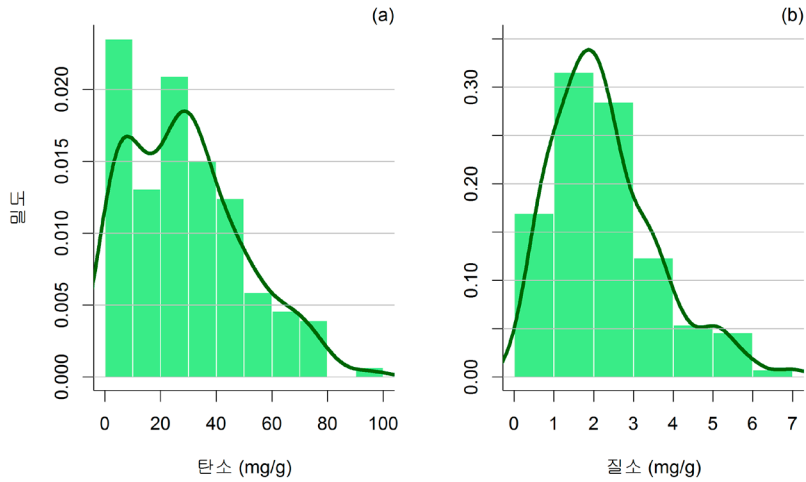


그림 3. 측정된 탄소와 질소의 히스토그램

표 2. 측정된 탄소와 질소의 통계 요약

	탄소(mg/g)	질소(mg/g)
최솟값	0.89	0.3
평균값	29.05	2.28
최댓값	95.1	7
표준편차	20.74	1.32
변동계수(%)	71.39	57.89
왜도	0.64	0.97
첨도	2.86	3.87

표 3. 토양 특성과 선택된 반사도 사이의 상관관계

파장*(nm)	440	550	650	700	901	1051	1401	1903	2201	2430
탄소	-0.66**	-0.70	-0.70	-0.68	-0.60	-0.54	-0.49	-0.45	-0.33	-0.29
질소	-0.61	-0.62	-0.62	-0.60	-0.55	-0.52	-0.48	-0.47	-0.36	-0.35

* 선택된 파장은 Dematté and da Silva Terra(2014)에서 참고하였음.

** 제시된 모든 상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의함.

실시하였다. 선택된 반사도는 토양특성과 모두 유의한 상관관계($p < 0.01$)를 보였다(표 3). 분석 결과에서 탄소와 -0.29부터 -0.70까지의 상관관계를 보였고, 질소와 -0.35에서 -0.62 사이의 상관관계를 보였다. 특히, 두 토양특성 모두가 가시광선 영역(400~700nm)에서 높은 상관관계를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 가시광선 영역이 탄소와 질소 예측모

델에서 중요한 변수로 작용할 것으로 예상할 수 있다.

2) 가시 근적외선 전처리에 따른 차이

그림 4는 153개 토양에서 측정된 전처리 전 반사도(350~2,500nm)를 보여주고 있다. 본 연구에서 제거되었던 400nm 이하에서는 다소 불안정한 파장이 나

탄한다. 파장이 높아지면서 입사에너지 반사 수치가 높아지며 1,700nm에서 점점 감소하는 경향을 보인다. 특히, 1,400, 1,900, 2,200nm에서 반사 수치가 갑자기 낮아지고, 반대로 흡수 수치가 높아지는 형태를 보인다(그림 4). 1,000nm에서는 측정 기기가 바뀌면서 약간의 급격한 차이가 발생한 것을 확인할 수 있다. 1,830nm에서도 비슷한 현상이 발생하였지만 시각적으로는 큰 차이는 보이지 않았다.

시각적인 평가를 위해 2개의 토양시료를 골라서 전처리에 따른 결과를 비교해 보았다(그림 5). 거의 모든 전처리 방식에서 1,400, 1,900, 2,200nm 영역이 강조되었다. 연속체 제거에서 가시광선 영역인 400~700nm에서 반사율이 강조된 것을 확인할 수 있다(그림 5b). Savitzky-Golay 필터와 웨이블릿 변환의 경우 다른 계산방식을 사용하지만 결과는 시각적으로 유사하게 나타났다(그림 5c~d). 1차와 2차 도함수 변환에서는 전반적으로 특정 영역만이 강조되고 다른 영역은 같은 수치로 나타난다(그림 5e~f). 또한 급격한 차이를 보였던 1,000nm에서 값이 커지거나 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 시각적으로 탄소 함량이 높으면 반사율 값이 전체적으로 낮은 것으로 나타났다. 연속체 제거의 경우, 가시광선 영역(400~700nm)에서 탄소 함량에 따라 반사율 값이 크게 달라진 것을 확인할 수 있다.

3) 토양 탄소와 질소 예측과 검증

전처리에 따른 검증 결과를 살펴보면, 연속체 제거가 탄소 예측에서 가장 낮은 평균 제공근 오차(9.53mg/g)를 보였다(표 4). Savitzky-Golay 필터(10.58mg/g)와 웨이블릿 변환(11.72mg/g) 또한 유사한 오차값을 보였고 큰 차이가 없었다. 1차 도함수(11.95mg/g)나 2차 도함수(13.22mg/g) 변환의 경우 약간 높은 오차값을 보였다. 질소 예측에서도 연속체 제거가 0.79mg/g로 가장 낮은 오차를 보였다. 다른 전처리 방법들도 탄소의 경우와 유사한 결과를 보였다. 2차 도함수 변환의 경우는 탄소와 질소 예측에서 가장 높은 평균 제공근 오차를 보였다. 결정계수의 경우 평균 제공근 오차와 동일한 결과를 보였고, 연속체 제거가 두 토양특성에서 가장 높은 결정계수를 획득하였다. 전체적으로 탄소의 잠재요인 수는 9~12개, 질소의 잠재요인 수는 5~11개로, 질소의 경우 잠재요인의 수가 적었다. 각 토양특성 내에서 전처리 방법 간에는 대체적으로 비슷하게 나타났다.

그림 6은 측정된 값과 예측값의 산포도를 보여주며, 이를 통해서 예측모델의 과소 또는 과대 추정 여부를 살펴볼 수 있다. 탄소의 경우 비교적 정확한 예측이 이루어졌지만, 질소의 경우 높은 값에서 다소 과소 추정된 것을 확인할 수 있다.

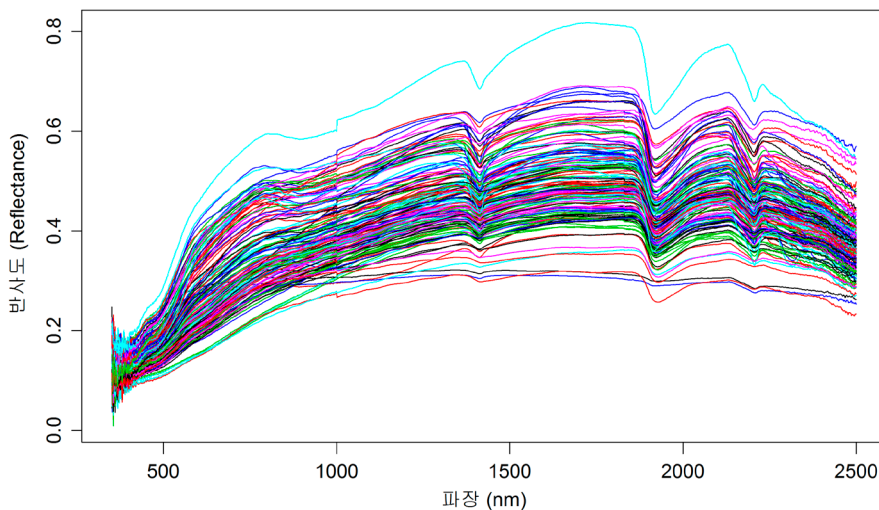


그림 4. 350~2,500nm에서 측정된 토양 반사도

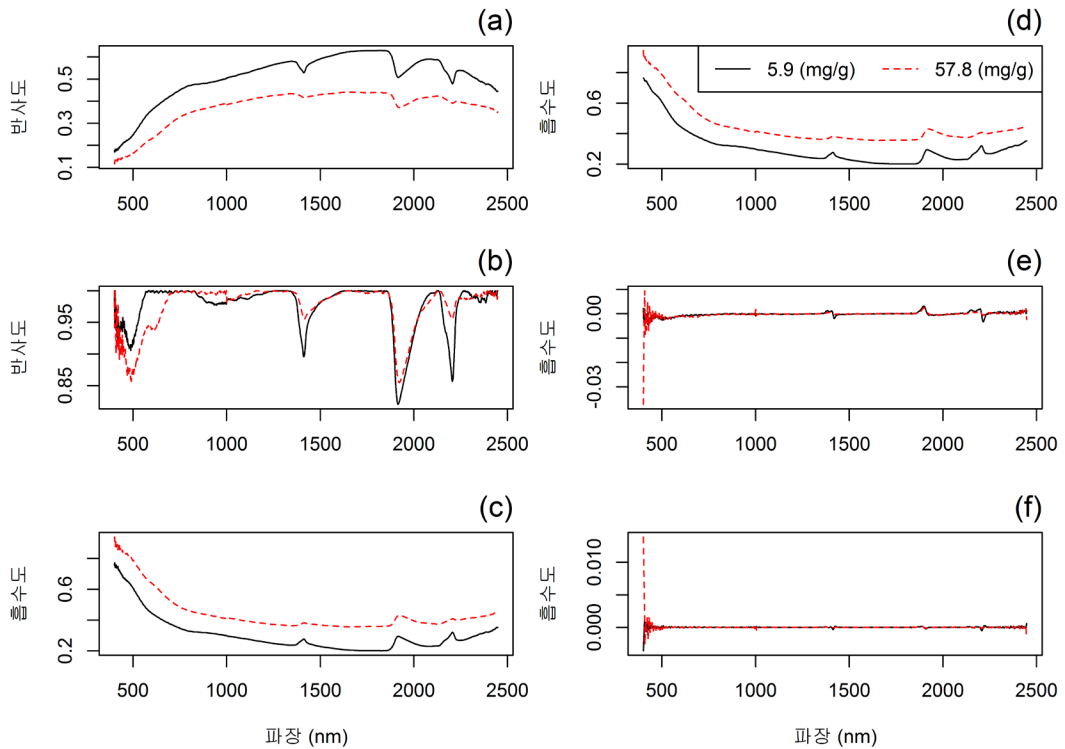


그림 5. 토양 탄소 함량과 전처리에 따른 분광특성 (a) 반사도, (b) 연속체 제거, (c) 웨이블릿 변환, (d) Savitzky-Golay 필터, (e) 1차 도함수 변환, (f) 2차 도함수 변환

표 4. 각 전처리에 따른 모델예측 평가

토양 특성		연속체 제거	웨이블릿	Savitzky-Golay	1차 도함수	2차 도함수
탄소	RMSE*	9.53 (11)**	11.72 (11)	10.58 (12)	11.95 (11)	13.22 (9)
	R ²	0.84	0.76	0.80	0.74	0.70
질소	RMSE	0.79 (5)	0.80 (6)	0.87 (11)	0.91 (6)	0.97 (5)
	R ²	0.72	0.71	0.66	0.62	0.58

* RMSE: 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error)

** 부분 최소제곱 회귀모형에서 사용된 잠재요인의 수

4. 토론

탄소 함량이 높으면 흡수율 수치가 낮은 것으로 나타났다(그림 5). 이는 일반적으로 토양시료 탄소의 함량이 높을수록 토양에 대한 입사 에너지의 흡수가 커지고 반사가 작아지는 것으로 확인된 결과이다(Jen-

sen, 2006; 최은영 등, 2010). Demattê and da Silva Terra(2014)의 연구에서 가시광선 영역인 650nm와 700nm가 토양 탄소예측에 중요한 파장대로 보고하였다. 본 연구에서도 550nm와 650nm에서 가장 높은 상관관계를 획득하였고, 따라서 유사한 결과를 얻었다. 이는 가시광선 영역이 토양의 어두운 정도를 구별해 줄 수 있는 중요한 파장이기 때문이다. 토양 탄소

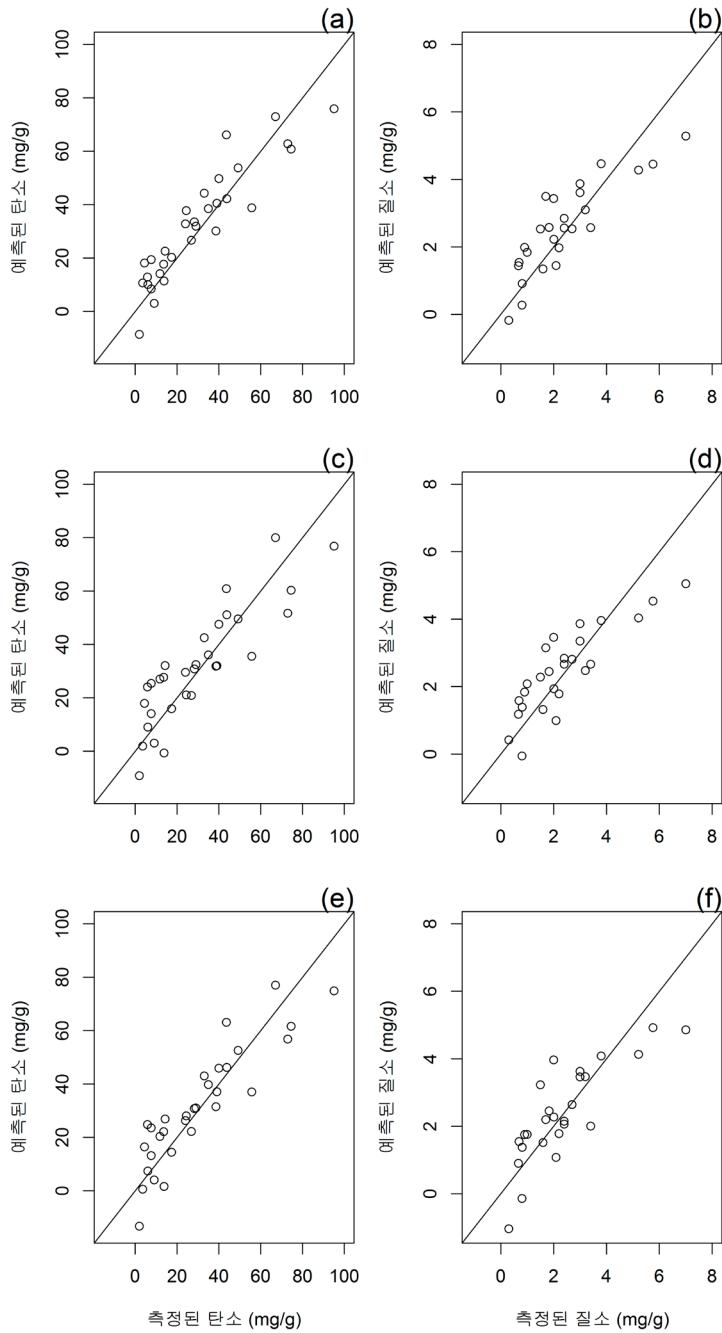


그림 6. 전처리에 따른 예측값과 측정값의 산포도
 (a)~(b) 연속체 제거, (c)~(d) 웨이블릿 변환, (e)~(f) Savitzky-Golay 필터

함량이 높을수록 토색이 어두우며, 따라서 가시광선 영역에서 흡수율 수치가 높게 나타난다(Rossel *et al.*,

2006). 또한 Stenberg *et al.*(2010)의 리뷰에 따르면 근 적외선 영역인 1,100, 1,600, 1,700~1,800, 2,000,

2,200, 2,400nm가 중요한 파장대임을 밝혔다. 질소는 유기물의 주요한 원소이기 때문에 토양 탄소와 강한 상관관계를 보인다. 따라서 질소 또한 근적외선 영역에서 강한 상관성을 보인다(Soriano-Disla *et al.*, 2014). 본 연구에서는 높은 상관성은 아니지만 유의한 결과를 보였다(그림 5).

검증 결과를 평가하기 위해 평균 제곱근 오차와 결정계수가 많이 사용되지만 연구지역의 환경에 따라 평균 제곱근 오차는 크게 달라질 수 있다. 따라서 다른 연구와 비교를 위해 결정계수 값을 중심으로 살펴 보았다. 본 연구의 검증 결과에서 탄소 예측의 결정계수는 0.70~0.84, 질소 예측의 결정계수 0.58~0.72로 나타났다. Chang *et al.*(2001)은 미국의 산지지역과 평지에 고루 퍼진 4개의 연구지역, 448개 지점에서 대략 800개 자료를 이용하여 토양 분광분석을 실시하였다. 예측결과에서 탄소($R^2=0.87$)와 질소($R^2=0.85$)에서 모두 높은 값을 보였다. Chang and Laird(2002)는 초지와 농경지만을 대상으로 108개의 토양자료를 사용하여 결정계수 0.91(탄소)과 0.86(질소)의 예측 결과를 보였다. Stevens *et al.*(2013)의 연구에서는 유럽 전체에서 토지피복에 따라 20,000개의 토양 자료를 취득한 뒤 토양예측을 실시하였다. 산림토양 탄소에 대해서 결정계수 0.75의 결과를 보였다. 국내 연구로는 최은영 등(2009)에서 30개의 토양통을 대표하는 156개의 토양자료를 이용하여 결정계수 0.85(탄소)의 높은 결과를 획득하였으며, 또한 최은영 등(2010)에서도 256개의 논토양을 이용하여 0.62(탄소)의 결정계수 값을 획득하였다. 마지막으로 Chun *et al.*(2012)와 Hong *et al.*(2014)의 연구에서는 토양탄소 예측에서 결정계수 0.70과 0.74의 검증 결과를 보였다. 따라서 본 연구에서 탄소의 경우 비교적 좋은 검증 결과로 판단되지만, 질소의 경우 다소 좋지 못하였다.

본 연구에서는 다양한 전처리 방법을 테스트하였다. 전처리 후 기본적인 흡수율의 형태에서 웨이블릿 변환이나 Savitzky-Golay 변환은 차이가 크지 않았다. 따라서 다소 사용하기 복잡한 웨이블릿 변환보다는 비교적 단순한 Savitzky-Golay 변환이 사용자 입장에서 편리할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 한 가지

매개변수 값만을 설정하고 평가하였으나, Savitzky-Golay 변환의 경우 이웃한 값의 범위를 조절할 경우 결과가 달라질 수 있다. 따라서 향후 연구에서 다양한 매개변수 값에 따른 전처리 방법의 평가가 진행되어야 한다. 1차나 2차 도함수 변환의 경우 결과가 좋지 못했고, 시각적으로는 심하게 왜곡되어 보였다(그림 5). 하지만 다른 토양자료에서 다른 결과를 보일 수 있다. 강조로 인해 반사도 값의 왜곡이 심하게 나타났던 연속체 제거는 오히려 좋은 결과를 보였기 때문이다.

이 논문에서는 탄소와 질소 자료에 대해서 다양한 전처리 방법을 사용할 경우 결과가 달라진다는 것과 전처리 후 변화를 시각적으로 확인하였다. 하지만 제시한 방법으로는 어떤 파장이 모델에서 중요한 역할을 했는지에 대해 알 수 없었다. 이는 변수선택이나 변수 중요도 분석과 같은 방법을 적용하면 알 수 있다(Rossel and Behrens, 2010; Stevens *et al.*, 2013). 또한 부분 최소제곱 회귀모형이 아닌 다른 방법을 사용할 경우 다양한 장점들이 있다. 랜덤 포레스트(Breiman, 2001), 서포트 벡터 회귀분석(Vapnik, 1995), 큐비스트(Quinlan, 1992) 등과 같은 기계학습 방법의 경우 토양특성과 흡수도의 비선형 관계를 고려할 수 있어 보다 좋은 결과들을 보였다(Rossel and Behrens, 2010; Stevens *et al.*, 2013). 특히, 큐비스트 같은 경우 예측식을 제공하기 때문에 모델 구조까지 파악할 수 있는 장점이 있다(Minasny and McBratney, 2008).

분광반사특성은 기존의 원격탐사 기술만큼 다양한 가능성이 존재한다. 분광반사특성을 이용한 토양 예측은 실험실만이 아닌 현장에서 가능함을 보여주었다(Rossel *et al.*, 2010b). 이는 일반적으로 수분함량이 분광반사특성에 크게 영향을 줄 수 있기 때문에 현장에서 시료를 채취 한 후 일부 자료를 실험실에서 분석하고 값을 보정하여 예측을 실시한다. 또한 이를 이용할 경우 자연지리와 관련된 분야에 다양하게 응용할 수 있다. 분광반사특성은 토양에 대한 다양한 정보를 담고 있기 때문에 지화학적인 원소들의 함량과 연결시켜 사면 발달 프로세스들을 이해할 수 있다(Dematrê and da Silva Terra, 2014). 이와 유사하게 Sweeney *et al.*(2012)의 연구에서는 분광반사특성을 이용하여

토양의 붉은 정도(풍화정도)를 정량화하고 이를 기반으로 침식의 변이성을 평가하였다. 위성영상분석과 함께 식생의 간섭이 적은 건조지역이나 간척지, 하천 범람원의 토양을 직접 예측한 것과 비교 평가할 수 있고, 시계열적인 변화도 추정할 수 있다(Choe *et al.*, 2008). 또한 반사분광학은 광물의 감정이나 구성원소 분석을 현장에서 실시할 수 있도록 도와준다(박형동 등, 2011).

지속가능한 농업과 환경 관리를 위해서는 보다 고해상도의 양적인 토양특성 자료들이 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위해서는 많은 분석 시간과 비용이 예상된다. 하지만 분광반사특성을 이용한 토양예측은 일부 토양자료만을 이용하여 대량의 자료를 생산할 수 있다. 따라서 우리나라 산지토양의 부족한 정보 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 공간적으로는 고해상도(예를 들어, 10cm 간격)의 자료(Adamchuk and Rossel, 2010)를 획득할 수 있고, 수직적으로도 토양 단면을 따라 정밀한 자료(Hartemink and Minasny, 2016)를 구축할 수 있으며, 관심이 적었던 모재층까지 자료를 구축할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 정밀한 자료는 지리학자들에게 새로운 연구 가능성을 제공할 수 있을 것이며, 다양한 환경모델에서 중요한 역할을 할 수 있을 것이다. 마지막으로 토지자원 관리에 중요한 기초 정보로 활용될 수 있을 것이다.

5. 결론

다양한 환경모델에 필요한 고해상도의 토양특성 자료에 대한 요구가 높아지고 있다. 하지만 이러한 토양특성을 분석하기 위해서는 많은 비용과 시간이 요구된다. 이러한 한계를 극복할 수 있는 방법이 토양 분광반사특성을 이용한 예측이다. 이는 토양특성 측정, 전처리, 상관성 획득, 토양예측으로 구성되어 있다. 다양한 전처리 방법이 있지만 이를 비교하고 평가하는 작업이 거의 이루어지지 못 했다. 본 연구에서는 토양 탄소와 질소 예측을 위해 5가지 전처리 방법을

비교하였다. 소양강 유역의 산림에서 153개의 샘플 채취한 뒤 분광반사특성을 측정하였다. 연속체 제거, Savitzky-Golay 변환, 이산 웨이블릿(wavelet) 변환, 1차와 2차 도함수 변환이 비교되었으며, 예측 모델로 부분 최소제곱 회귀모형이 사용되었다. 검증에 위해 122개 훈련자료와 31개의 검증자료로 나누어 평가하였다.

토양시료 탄소의 함량이 높을수록 토양에 대한 입사 에너지의 흡수가 커지고 반사가 작아지는 특성을 보였다. 구체적으로 가시광선 영역인 650nm와 700nm에서 두 토양특성과 가장 높은 상관관계를 보였다. 전처리 비교에서 연속체 제거가 가장 낮은 평균 제곱근 오차를 보였다. 또한 결정계수 0.84(탄소)와 0.72(질소)의 검증결과를 보였다. 따라서 연속체 제거가 가장 효과적인 전처리 방법으로 고려되었다. 전처리 후 시각적인 평가에서 웨이블릿 변환이나 Savitzky-Golay 변환은 차이가 거의 없었고 평가 결과도 유사했다. 다소 이용이 간단한 Savitzky-Golay 변환이 사용자에게 더 좋을 것으로 판단된다.

본 연구에서 언급된 전처리 비교 결과는 분광반사특성을 이용한 토양예측 시 연구자에게 모델 정확도를 높이는 데 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 토양 분광반사특성은 산지토양 예측에 효과적으로 사용될 수 있으며, 많은 토양특성 자료를 빠른 시간에 저비용으로 만들어 낼 수 있을 것으로 기대된다. 덧붙여 이를 활용한 다양한 응용연구가 기대된다.

사사

논문을 검토해준 서울대 지리학과 심우진에게 감사의 마음을 전합니다. 논문에 대한 좋은 의견을 주신 심사위원들에게 감사드립니다.

참고문헌

강신규·John Tenhunen, 2010, “산지복잡지형과 생태적

- 비균질성: 산지경관의 생산성과 수자원/수질에 관한 생태계 서비스 평가,” 한국농림기상학회지, 12(4), 307-316.
- 박수진·손연규·홍석영·박찬원·장용선, 2010, “한국 주요 토양유형의 공간적 분포와 토양형성요인을 이용한 예측가능성 평가,” 대한지리학회지, 45(1), 95-118.
- 박형동·현창욱·오승찬, 2011, 에너지자원 원격탐사, 씨아이알.
- 정관용, 2011, “산지토양특성의 공간적 분포와 예측가능성,” 지리학논총, 57, 21-42.
- 정관용·박수진, 2015, “지형분류를 이용한 산지 토양 예측가능성,” 한국지형학회지, 22(3), 43-61.
- 정진현·구교상·이충화·김춘식, 2002, “우리나라 산림 토양의 지역별 이화학적 특성,” 한국임학회지, 91(6), 694-700.
- 최은영·홍석영·김이현·송관철·장용선, 2009, “가시·근적외 분광 스펙트럼을 이용한 토양 이화학적 추정,” 한국토양비료학회지, 42(6), 522-528.
- 최은영·홍석영·김이현·장용선, 2010, “분광학을 이용한 토양 유기물 추정 및 분포도 작성,” 한국토양비료학회지, 43(6), 968-974.
- Adamchuk, V. I. and Rossel, R. A. V., 2010, Development of On-the-Go Proximal Soil Sensor Systems, In R. A. V. Rossel, A. B. McBratney and B. Minasny (eds.), *Proximal Soil Sensing*, Springer, Dordrecht, 15-28.
- Akansu, A. N. and Haddad, R. A., 2001. *Multiresolution Signal Decomposition: Transforms, Subbands, and Wavelets*, Academic Press, San Diego.
- Breiman, L., 2001, Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32.
- Chang, C. W., Laird, D. A., Mausbach, M. J. and Hurburgh, C. R., 2001, Near-Infrared Reflectance Spectroscopy-Principal Components Regression Analyses of Soil Properties, *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 480-490.
- Chang, C. W. and Laird, D. A., 2002, Near-infrared reflectance spectroscopic analysis of soil C and N, *Soil Science*, 167(2), 110-116.
- Choe, E., van de Meer, F., van Ruitenbeek, F., van der Werff, H., de Smeth, B. and Kim, K., 2008, Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain, *Remote Sensing of Environment*, 112, 3222-3233.
- Chun, H. C., Hong, S. Y., Song, K. C. and Kim, Y., 2012, Predicting Organic Matter content in Korean Soils Using Regression rules on Visible-Near Infrared Diffuse Reflectance Spectra, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 45(4), 497-502.
- Clark, R. N. and Roush, T. L., 1984, Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 6329-6340.
- Dayal, B. S. and MacGregor, J. F., 1997, Improved PLS Algorithms. *Journal of Chemometrics*, 11, 73-85.
- Demattê, J. A. M. and da Silva Terra, F., 2014, Spectral pedology: A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations, *Geoderma*, 217-218, 190-200.
- Donoho, D. L. and Johnstone, I. M., 1994, Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage, *Biometrika*, 81(3), 425-455.
- Hartemink, A. E. and Minasny, B., 2016, *Digital soil morphometrics*, Springer International Publishing, Switzerland.
- Hong, S. Y., Lee, K., Minasny, B., Kim, Y. and Hyun, B. K., 2014, Predicting Soil Chemical Properties with Regression Rules from Visible-near Infrared Reflectance Spectroscopy, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 47(5), 319-323.
- Jensen, J. R., 2006, *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective*, Pearson education.
- Lal, R., 2004, Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security, *Science*, 304 (5677), 1623-1627.
- McBratney, A. B., Mendonca Santos, M. L. and Minasny, B., 2003, On digital soil mapping, *Geoderma*, 117, 3-52.
- McKay, M. D., Beckman, R. J. and Conover, W. J., 1979, A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output

- from a computer code, *Technometrics*, 21(2), 239-245.
- Minasny, B. and McBratney, A. B., 2006, A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information, *Computers & Geosciences*, 32(9), 1378-1388.
- Minasny, B. and McBratney, A. B., 2008, Regression rules as a tool for predicting soil properties from infrared reflectance spectroscopy, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 94(1), 72-79.
- Nason, G., 2008, *Wavelet methods in statistics with R*, Springer Science & Business Media, New York.
- Park, S. J., Ruecker, G. R., Agyare, W. A., Akramhanov, A., Kim, D. and Vlek, P. L. G., 2009, Influence of Grid Cell Size and Flow Routing Algorithm on Soil-Landform Modeling, *Journal of the Korean Geographical Society*, 44(2), 122-145.
- Quinlan, J. R., 1992, *C4. 5: Programming for machine learning*, Morgan Kaufmann, California.
- Ramirez-Lopez, L. and Stevens, A., 2014, Pre-processing, sampling and modelling (soil) vis-IR data using the 'prospectr' and 'resemble' packages, *Pedometron*, 34, 9-14.
- Rossel, R. A. V., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J. and Skjemstad, J. O., 2006, Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties, *Geoderma*, 131(1-2), 59-75.
- Rossel, R. A. V. and Lark, R. M., 2009, Improved analysis and modelling of soil diffuse reflectance spectra using wavelets, *European Journal of Soil Science*, 60(3), 453-464.
- Rossel, R. A. V. and Behrens, T., 2010, Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra, *Geoderma*, 158(1-2), 46-54.
- Rossel, R. A. V., Rizzo, R., Dematté, J. A. M. and Behrens, T., 2010a, Spatial Modeling of a Soil Fertility Index using Visible-Near-Infrared Spectra and Terrain Attributes, *Soil Science Society of America Journal*, 74(4), 1293-1300.
- Rossel, R. A. V., McBratney, A. B. and Minasny, B., 2010b, *Proximal soil sensing*, Springer Science & Business Media, Dordrecht.
- Savitzky, A. and Golay, M. J. E., 1964, Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627-1639.
- Schoenholtz, S. H., Van Miegroet, H. and Burger, J. A., 2000, A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunities, *Forest Ecology and Management*, 138(1-3), 335-356.
- Scull, P., Franklin, J., Chadwick, and O. A., McArthur, D., 2003, Predictive soil mapping: a review, *Progress in Physical Geography*, 27(2), 171-197.
- Shukla, M. K., 2011, *Soil hydrology, land use and agriculture: measurement and modelling*, CABI, Oxfordshire.
- Soriano-Disla, J. M., Janik, L. J., Rossel, R. A. V., Macdonald, L. M. and McLaughlin, M. J., The performance of visible, near-, and mid-infrared reflectance spectroscopy for prediction of soil physical, chemical and biological properties, *Applied Spectroscopy Reviews*, 49(2), 139-186.
- Stenberg, B., Rossel, R. A. V., Mouazen, A. M. and Wetterlind, J., 2010, Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science, *Advances in agronomy*, 107, 163-215.
- Stenberg, B. and Rossel, R. A. V., 2010, Diffuse reflectance spectroscopy for high-resolution soil sensing, In R. A. V. Rossel, A. B. McBratney and B. Minasny (eds.), *Proximal Soil Sensing*, Springer, Dordrecht, 29-47.
- Stevens, A., Nocita, M., Tóth, G., Montanarella, L. and van Wesemael, B., 2013, Prediction of Soil Organic Carbon at the European Scale by Visible and Near InfraRed Reflectance Spectroscopy, *PLoS ONE*, 8(6).
- Sweeney, K. E., Roering, J. J., Almond, P. and Reckling, T., 2012, How steady are steady-state landscapes? Using visible-near-infrared soil spectroscopy to quantify erosional variability, *Geology*, 40, 807-810.
- Vapnik, V., 1995, *The Nature of Statistical Learning Theory*,

- Springer Verlag, New York.
- Vitousek, P. M., Hättenschwiler, S., Olander, L. and Allison, S., 2002, Nitrogen and Nature, *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 31(2), 97-101.
- Wold, S., Ruhe, A., Wold, H. and Dunn III, W. J., 1984, The collinearity problem in linear regression, the partial least squares (PLS) approach to generalized inverses, *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 5(3), 735-743.

교신: 정관용, 바이로이트 대학 지구과학과(이메일: Gwanyong.Jeong@uni-bayreuth.de)

Correspondence: Gwanyong Jeong, Department of Geosciences, University of Bayreuth, Universitaetsstrasse 30, 95447 Bayreuth, Germany (e-mail: Gwanyong.Jeong@uni-bayreuth.de)

최초투고일 2016. 8. 1

수정일 2016. 8. 16

최종접수일 2016. 8. 30