

## 분광학을 이용한 토양 유기물 추정 및 분포도 작성

최은영 · 홍석영\* · 김이현 · 장용선

농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료관리과

### Estimation and Mapping of Soil Organic Matter using Visible-Near Infrared Spectroscopy

Eun-Young Choe, Suk-Young Hong\*, Yi-Hyun Kim, and Yong-Seon Zhang

Soil & Fertilizer Management Division, National Academy of Agricultural Science, RDA

We assessed the feasibility of discrete wavelet transform (DWT) applied for the spectral processing to enhance the estimation performance quality of soil organic matters using visible-near infrared spectra and mapped their distribution via block Kriging model. Continuum-removal and 1<sup>st</sup> derivative transform as well as Haar and Daubechies DWT were used to enhance spectral variation in terms of soil organic matter contents and those spectra were put into the PLSR (Partial Least Squares Regression) model. Estimation results using raw reflectance and transformed spectra showed similar quality with  $R^2 > 0.6$  and  $RPD > 1.5$ . These values mean the approximation prediction on soil organic matter contents. The poor performance of estimation using DWT spectra might be caused by coarser approximation of DWT which not enough to express spectral variation based on soil organic matter contents. The distribution maps of soil organic matter were drawn via a spatial information model, Kriging. Organic contents of soil samples made Gaussian distribution centered at around  $20 \text{ g kg}^{-1}$  and the values in the map were distributed with similar patterns. The estimated organic matter contents had similar distribution to the measured values even though some parts of estimated value map showed slightly higher. If the estimation quality is improved more, estimation model and mapping using spectroscopy may be applied in global soil mapping, soil classification, and remote sensing data analysis as a rapid and cost-effective method.

**Key words:** Estimation, Kriging, Partial Least Squares Regression, Soil organic matters, Spectra

## 서 언

최근 정밀농업은 경작지의 지형적 특징, 토양유형과 토양의 물리·화학적 특성 등에 적합한 시비와 재배관리를 적용하여 생산비용을 절감하고 농약 및 비료의 남용을 막아 환경오염을 줄이려는 노력을 하고 있다. 이러한 정밀농업의 국소적 처방을 위해서 경작지의 토양 분석 요구가 급증하고 있다. 이 중에서 유기물 함량은 질소 비료의 시비량을 나타낼 수 있고, 유기물의 시용은 양분 및 미량요소 공급 및 토양 구조개선, 양분 및 수분 보유능 증대, 경운성 향상, 미생물 활동 촉진 등 직간접적인 효과로 그 중요성이 높다 (Cho et al., 2001). 기존의 화학적 분석법은 분석의 정밀도, 시료의 수, 분석항목 등에 따라 시간, 인력, 비용이 많이 소요되므로 신속하고

간단한 토양 분석기술에 대한 많은 관심이 모아지고 있다 (Ferrier, 1999; Kemper and Sommer, 2002; Choe et al., 2008). 신속하고 비파괴적인 정성·정량 분석방법으로 분광학 기술에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있는데, 그 중에서 가시·근적외선 분광학 (VNIR, 400-2400 nm)은 다양한 분광 영역대에서 다양한 성분에 의한 고유 흡수 스펙트럼이 존재해 중회귀분석이 가능하고 에너지 강도가 증적외선 영역보다 높아 토양 분석에 활용성이 높다고 알려져 있다 (Ben-Dor, 1999; Choe et al., 2008). 가시·근적외선 분광학은 농업 및 환경 분야에서 토성과 화학성분 분석 (Ben-Dor and Banin, 1995; Thomasson et al., 2001; Ge et al., 2007) 및 작물의 양분공급상태 (Curran, 1989; Chen et al., 2002), 수계의 부유물 등의 분석 (Chen et al., 1992)과 같은 토양과 수질 모니터링에 대한 다양한 시도가 있었다. 또한 비교적 단순한 광원이 이용되어 증적외선 분광기에 비해 가볍고 단순한 장치구성이 가능하여 현장측정용으로도 활

접수 : 2010. 11. 29 수리 : 2010. 12. 14

\*연락처 : Phone: +82312900344

E-mail: syhong67@korea.kr

용되고 있다. 그러나 토양시료 내에 존재하는 다양한 물질의 고유한 흡수 피크의 중첩에 의해 분석에 어려움이 발생하기도 한다. 이러한 중첩에 의한 분석오차를 줄이기 위해 스펙트럼의 도함수 변환, Continuum 제거 등 다양한 스펙트럼 전처리가 적용되고 있다. 최근에는 정보 압축, 시계열해석, 영상처리, 수치해석, 탄성과 탐사 파형 해석 등에 활용되고 있는 웨이블릿 변환 (Wavelet Transform) 은 입력 신호를 여러 기저함수 (Basis function)로 분해하여 파형을 분석하는 등 분광 스펙트럼의 분석에 적용하는 시도가 있다. 원래 웨이블릿이란 작은 파를 뜻하는 말로 진동이나 파동을 취급하는 분야에서 오래 전부터 사용해 왔다 (Kim, 1995). Ge et al. (2007)은 토양의 스펙트럼과 합성 스펙트럼에 이산 웨이블릿 변환 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 을 적용하여 점토 함량을 추정한 연구를 수행한 바 있다. 본 연구에서는 토양의 가시·근적외선 스펙트럼의 피크중첩 등에 의한 분석오차를 감소시킴으로써 토양유기물 추정의 정확도 향상을 위해 이산 웨이블릿 변환 신호처리 기법의 적용을 검토하고 공간정보 모델링을 통해 토양유기물의 분포도를 작성하고자 하였다.

### 재료 및 방법

**토양 시료 분석** 본 연구에서 토양시료는 철원군 농업기술센터에서 철원일대에서 채취하고 검정한 논토양 256점을 사용하였다. Figure 1에 나타난 것처럼 시료는 주로 철원읍, 동송읍, 갈말읍, 김화읍, 서면, 근남면에서 채취되었다. 토양의 유기물 함량과 함께 pH, 유효인산, 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘이 측정되었다 (NIAS, 2000).

반사 분광 스펙트럼은 화학분석에 사용한 동일한 토양 시료를 반경 32 mm 샘플 홀더에 10 mm 두께로 담고 ASD FieldSpec Pro (Analytical Spectral Devices Inc., USA) 를 이용하여 400–2500 nm 범위에서 반사도를 측정하였다. 측정 시에는 Probe에 장착된 할로겐 램프를 이용하여 입사 에너지를 균일하게 하였고, Spectralon diffuse reflectance panel을 이용하여 Calibration하였다. 측정상 스펙트럼

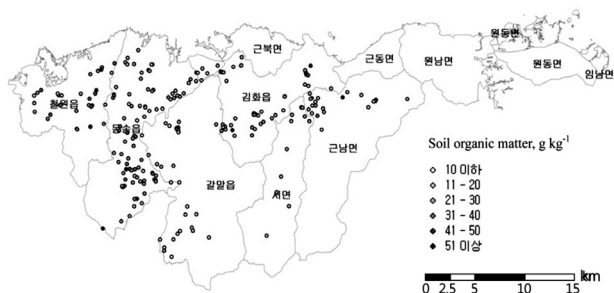


Fig. 1. Sampling location and soil organic matter contents in Cheolwon-gun.

의 잡음과 오차를 최소화하기 위해 매 측정 시마다 50 회 스캐닝한 스펙트럼을 3회 반복 측정하여 평균하였다.

**분광 스펙트럼의 신호처리** 토양의 가시·근적외선 스펙트럼에 2차원 이산 웨이블릿 변환을 적용하고 Continuum 제거 스펙트럼, 도함수 변환을 적용한 스펙트럼과 비교 분석하여 가능성을 살펴보았다. Continuum 제거 스펙트럼의 불룩한 부분을 연결하는 일종의 Background line으로 볼 수 있으며 이를 제거함으로써 스펙트럼의 흡수, 반사 형태를 강조할 수 있다 (van der Meer, 2006). 또한 도함수 변환을 하면 Continuum 제거 효과와 함께 스펙트럼의 변화를 강조할 수 있다. 웨이블릿 (Wavelet)은 웨이블릿 크기를 결정하는 압축계수 (Scale)와 시간 축으로의 이동에 관계되는 전이계수 (Translation)로 구성된 함수의 집합체로, 웨이블릿 변환은 입력신호를 특정기저함수 (Basis function)의 집합으로 분해하여 표현하는 하나의 방법이다 (Kim, 1995). 신호를 분리하는 과정에서 Fig. 2의 스펙트럼을 다단계로 Approximation (A)과 Detail coefficient (D)로 분리함으로써 일종의 신호 ( $cA_1$ )와 잡음 ( $cD_{1,2,3,...}$ )으로 분리하여 나타낼 수 있다. 모웨이블릿 함수와 스케일링 함수, 좌우대칭성, 직교성 등에 의해 Haar, Daubechies, Meyer, Morlet 등 다양한 웨이블릿이 적용될 수 있다. 그 중에서 Haar 웨이블릿은 매끄러운 신호나 영상처리에 적합하지 않은 단점이 있으나 웨이블릿의 기본성질인 허용조건, 진동조건, 상호 직교성을 가지고 있는 가장 일반적이고 간결한 형태이면서 계산 속도가 빠르고 쉽게 구현이 가능한 특징이 있다. Daubechies 웨이블릿은 직교 웨이블릿 필터의 특징을 가지고 있으면서 영상처리에 활용될 수 있다 (Misiti et al., 1996; Misman et al., 2010). 본 연구에서는 Level-5의 Haar와 Daubechies를 스펙트럼의 신호처리에 적용하여 비교하였다.

토양 유기물 추정식 분광 스펙트럼으로부터 토양의 유기물 함량을 추정하기 위해 식 (1)과 (2)와 같이 부분 최소제곱 회귀식 (Partial least squares regression; PLSR)을 이용하여 통계적 정량 모델을 구하였다.

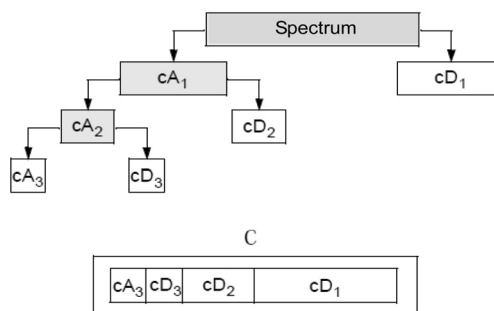


Fig. 2. Extracting approximation (A) and detail coefficients (D) from spectrum for DWT (3-level).

$$X = TP^T + E \tag{1}$$

$$Y = TQ^T + F \tag{2}$$

$X$ : ( $n \times m$ ) matrix of predictors,  
 $Y$ : ( $n \times p$ ) matrix of responses  
 $T$ : ( $n \times l$ ) matrix of score, component or factor matrix  
 $P, Q$ : ( $m \times l$ ), ( $p \times l$ ) loading matrices,  
 $E, F$ : error terms

DWT, 도함수, Continuum-removal의 변환을 거친 스펙트럼 및 원시 분광 스펙트럼 (Raw reflectance)을 적용하여 토양유기물 추정 모델을 구하고 각각의 성능을 비교하였다. 추정모델의 성능에 대해서 RMSE (Root mean square error),  $R^2$ , RPD (Ratio of prediction to deviation)를 이용하여 검증하였다.  $R^2$ 의 경우, 0.9 이상에서 정확한, 0.8-0.9에서 좋은, 0.66-0.8에서 대략적인, 0.5-0.65에서 약한 추정이라고 할 수 있고, RPD의 경우 2.5 이상에서 정확한, 2이상에서 좋은, 1.5이상에서 대략적인 추정이라고 판정할 수 있다 (Williams, 2001; Farifteh et al., 2007).

**공간정보모델을 이용한 매핑** 일정한 구역의 전체 평균을 대표하는 값을 구할 필요가 있을 때 원하는 구역에 대하여 하나의 크리깅 방정식을 세워 값을 예측하는 구역 크리깅 (Block Kriging)을 이용할 수 있다. 산술평균을 적용하기에 큰 어려움이 없는 특성값의 경우에 구역 크리깅이 단순 크리깅보다 더 신뢰할 만한 결과를 도출하므로 본 연구에서는 구역 크리깅을 이용하여 토양 유기물의 분포를 나타내었다. 구역 크리깅을 수행하기 위해서 전체 공간을  $10 \times 10$  크기의 구역으로 나누었다. 구역 크기로 값을 예측하고자 하는 영역에 일정한 수의 계산지점을 산출하는데, 계산지점이 많을수록 구역 크리깅의 정확도는 높아지지만 그만큼 많은 양의 계산을 요하게 된다. Figure 3과 같이 각 구역에는 이미 알고있

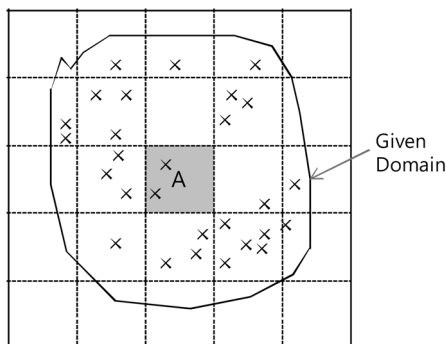


Fig. 3. Block Kriging representing block A.

Table 1. Input parameters of Kriging model.

| Parameters             | Value        |
|------------------------|--------------|
| Block Size             | X: 10, Y: 10 |
| Interpolation Distance | 200          |
| Variogram Model        | Exponential  |
| - No. of Lags          | 30           |
| - Lag Tolerance (%)    | 50           |

는 자료값이 포함될 수 있고 없을 수도 있으며 기존 자료의 존재는 계산지점을 정하는데 영향을 미치지 않는다. 구역 내 대표적인 계산지점은 주관적인 요소로 인한 편향을 방지하기 위해 반드시 균일하게 분포하도록 하여야 한다 (Isaaks and Srivastava, 1989). 구역을 대표하는 예측치는 이미 알고 있는 자료값의 선형조합을 이용하여 예측하며, n개의 알고 있는 자료값을 이용하여 식 (3)과 같은 오차분산식과 구역 크리깅 행렬 방정식을 구할 수 있다 (Choe, 2004).

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \dots & \sigma_{1n}^2 & -1 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \dots & \sigma_{2n}^2 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{n1}^2 & \sigma_{n2}^2 & \dots & \sigma_{nn}^2 & -1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{A1}^2 \\ \sigma_{A2}^2 \\ \dots \\ \sigma_{An}^2 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

where,  $\sigma_{Ai}^2 = Cov(z_A = z_i) = \frac{1}{n_b} \sum_{j=1}^{n_b} Cov(z_0, z_i)$

본 연구의 크리깅을 이용한 매핑은 Vesper 1.6 (Australian Centre for Precision Agriculture, Australia)을 이용하였고 입력 파라미터의 값은 Table 1에 요약하였다.

### 결과 및 고찰

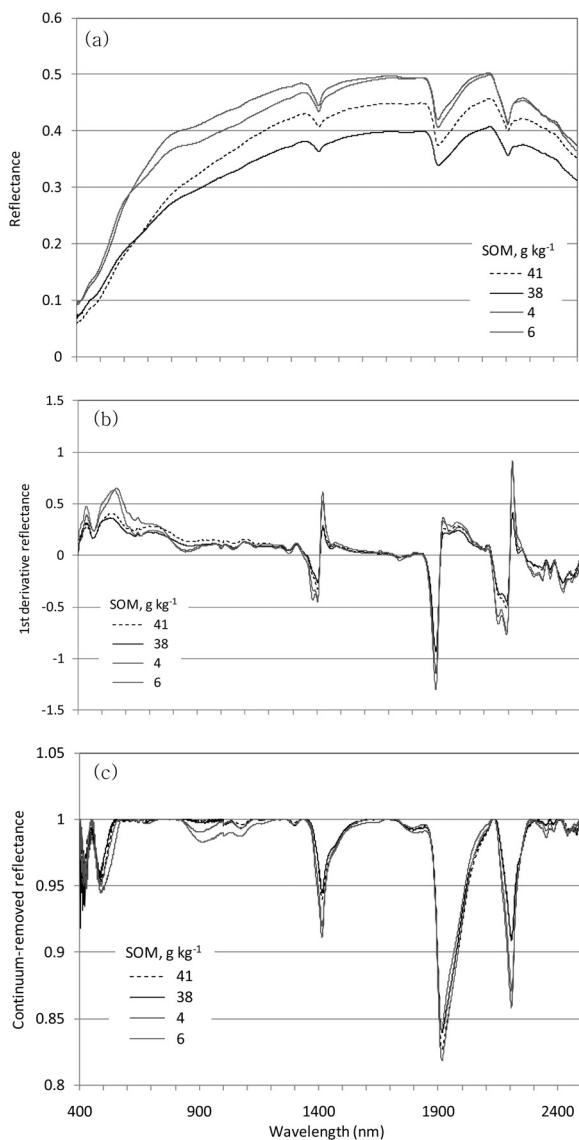
**토양 시료 분석결과** 256개 토양 시료의 pH, 유기물, 유효인산, 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘에 대한 화학분석 결과는 Table 2에 나타내었다. 토양 유기물 함량은 평균  $22 \text{ g kg}^{-1}$  정도로 최저 3, 최대  $71 \text{ g kg}^{-1}$ 까지의 값을 나타내었고 평균값을 중심으로 전체적으로 정규분포를 나타내었다.

유기물 함량 차이에 의한 토양 시료의 반사 스펙트럼의 변화를 보이기 위해 토양 시료 중에서 극단적인 값을 가진 시료의 스펙트럼을 Fig. 4에 비교하여 나타내었다. Figure 4 (a)의 400-1000 nm 영역에서 약  $40 \text{ g kg}^{-1}$  정도의 유기물을 함유하고 있는 토양시료의 스펙트럼이 상대적으로 낮은 토양 유기물 시료의 스펙트럼에 비해 Intensity가 낮아지고 있다. 대개 토양 내 유기물의 함량이 증가할수록 토양에 대한 입사 에너지의 흡수가 커

**Table 2. Statistics of measured soil properties.**

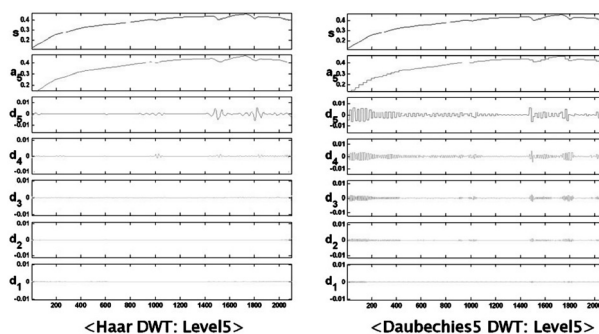
| Statistics      | pH  | OM<br>g kg <sup>-1</sup> | Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>mg kg <sup>-1</sup> | Ex. K<br>----- | Ex. Ca<br>cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ----- | Ex. Mg<br>----- |
|-----------------|-----|--------------------------|---|----------------|--|-----------------|
| Average         | 6.1 | 21.8                     | 215   | 0.6            | 6.2  | 2.2             |
| Max.            | 7.4 | 71.0                     | 1929  | 4.0            | 20.2   | 6.8             |
| Min.            | 4.0 | 3.0                      | 13  | 0.1            | 0.9  | 0.2             |
| SD <sup>†</sup> | 0.5 | 10.3                     | 323   | 0.5            | 2.3  | 1.3             |

<sup>†</sup>Standard deviation.



**Fig. 4. Comparison of (a) raw reflectance, (b) continuum-removed, and (c) 1<sup>st</sup> derivative spectra at 4, 6, 38, and 41 g kg<sup>-1</sup> of soil organic matters.**

지고 분광반사가 작아지면서 스펙트럼의 변화가 발생한다 (Jensen, 2000). 토양의 분광 스펙트럼에서 1400, 1900 nm 영역에서 수산화기 (OH)에 의한 흡수가 관찰되었으나, 측정 시료는 모두 동일한 조건으로 건조한 뒤 측정



**Fig. 5. Level 5 of Haar and Daubechies DWT results (s: original spectrum, a: approximation, d: detail coefficients).**

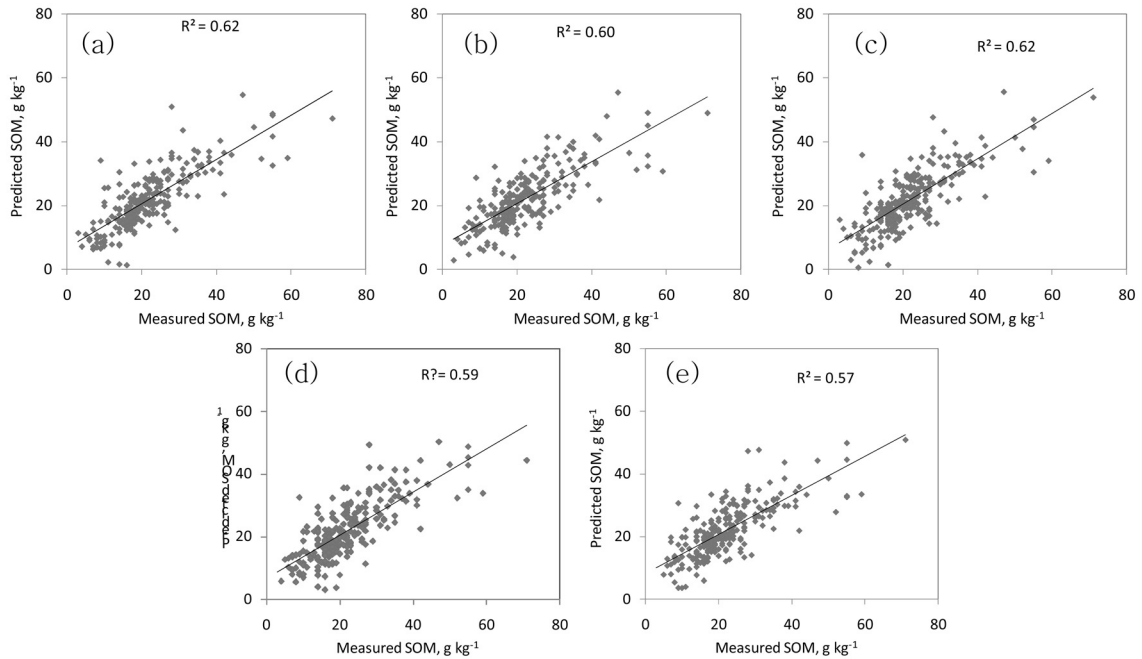
하여 토양의 함수량에 의한 스펙트럼의 차이보다는 토양을 구성하고 있는 광물과 같은 무기물에 존재하는 자유수 (Free water)와 격자구조 내의 OH분자에 의한 것으로 보인다 (Ben-Dor et al., 1999). 또한, 2200 nm 부근에서의 분광 흡수대는 토양 내에 존재하는 점토광물 등에 포함된 Al-O-H, Si-O-H, Mg-O-H 등에 의한 영향이 큰 것으로 알려져 있다 (Pieters and Englert, 1993).

**스펙트럼 전처리** 측정된 분광 스펙트럼은 유기물의 함량이 증가함에 따라 스펙트럼이 변화하는 양상을 나타내었으나 Fig. 4 (a)에 나타나는 것과 같이 일정한 Background line (Continuum)이 포함되어 있어서 스펙트럼의 강도를 비교하는데 어려움이 있다. Figure 4 (b)와 같이 Continuum을 제거한 스펙트럼은 각 영역에서 분광흡수 형태가 강조되었고, 1차 도함수로 변환된 스펙트럼에서도 Continuum에 의한 강도 차이가 배제되어 흡수 영역의 변이량이 강조되어 정량적인 변화를 쉽게 인지할 수 있었다 (Fig. 4 (b), (c)). 이산 웨이블릿 변환에서는 Haar, Daubechies 모두 5단계의 Approximation, Detail coefficients 분리를 수행하여 5 번째 Approximation (a<sub>5</sub>) 스펙트럼을 활용하였다 (Fig. 5).

**토양 유기물 함량 추정** 반사 스펙트럼과 Continuum 제거 및 도함수, Haar, Daubechies DWT변환된 스펙트럼을 PLSR 모델에 대입하여 토양유기물 추정식을 산출

**Table 3. Performance quality of the estimation models for soil organic matters, using each input spectrum, Reflectance (R), Continuum-removed (CR), 1<sup>st</sup> derivatives (Deriv1), and DWT spectra (Haar and Daubechies).**

| Statistics     | R    | CR   | Deriv1 | DWT    |              |
|----------------|------|------|--------|--------|--------------|
|                |      |      |        | Haar-5 | Daubechies-5 |
| R <sup>2</sup> | 0.62 | 0.60 | 0.62   | 0.57   | 0.60         |
| RMSE           | 6.37 | 6.54 | 6.39   | 6.77   | 6.59         |
| RPD            | 1.61 | 1.57 | 1.61   | 1.52   | 1.56         |



**Fig. 6. Comparison of observed and predicted values by the classified prediction model using (a) raw reflectance, (b) continuum-removed, (c) 1<sup>st</sup> derivatives, (d) Daubechies DWT, and (e) Haar DWT spectra.**

하여 추정된 결과를 비교하였다. Table 3의 추정 모델 별로 각 항목에 대한 결정계수 ( $R^2$ )를 살펴보면, 반사 스펙트럼과 변환된 스펙트럼들 모두 약 0.6 정도로 비슷한 결과를 나타내었다. 각 추정식의 추정값과 실측값의 분포를 Fig. 6에서 비교하였다. RMSE, RPD에 대해서도 5가지의 경우 모두 약간의 차이는 있지만 비슷한 결과를 나타내었다. 그 중에서 원시 반사 스펙트럼 ( $R^2=0.62$ , RMSE=6.37, RPD=1.61)과 1차 도함수 ( $R^2=0.62$ , RMSE=6.39, RPD=1.61)가 약간 더 나은 결과를 보였으나  $R^2 > 0.6$ , RPD  $> 1.5$ 의 '대략적인' 추정의 범주에 속하였다. 잡음을 줄이고 신호값을 향상시키기 위해 이산 웨이블릿 변환을 적용한 결과에서 오히려 낮은 성능을 나타내었는데 Fig. 5에서 보는 바와 같이 분리시킨 Detail coefficients (D)에 의해 토양 유기물 함량을 표현하기에 성긴 근사값 (Coarser approximation) 스펙트럼으로 변환되어 추정식의 유의성이 낮아졌을 가능성이 있다. 따라서 토양의 분광스펙트럼에 더 적합한 이산 웨이블릿 필터와 변환수준 등의 DWT 조건을 찾고 적용함으로써 추정식의 유의

성을 향상시킬 수 있을 것으로 본다. 또한, 본 연구에서는 반사 스펙트럼의 400–2500 nm 전 영역의 파장대 스펙트럼을 사용함으로써 특정 영역에서 간섭을 일으키는 물질의 영향을 덜 받고자 하였으나 유기물에 의한 에너지의 흡수, 반사를 일으키는 주요 파장대의 상관성을 분석하여 해당 영역의 스펙트럼이나 파라미터 값을 산출하여 추정모델에 적용하는 시도도 필요할 것으로 사료된다.

**크리깅 모델을 이용한 토양 유기물 매핑** 토양 유기물 함량의 실측값과 PLSR 모델에 의한 추정값을 이용해 구역 크리깅을 수행하였다. 철원 일대의 256개 지점의 자료값이 사용되었으며 자료의 분포가 일정 간격으로 고르게 분포하지는 않았지만 구역 크리깅의 특징상 자료값의 분포경향을 표출할 수 있다 (Choe, 2004). 토양 샘플의 유기물 분석값은 평균 약 20 g kg<sup>-1</sup>으로 평균값을 중심으로 정규분포를 나타내었는데 크리깅 지도에서도 전반적으로 20~30 g kg<sup>-1</sup> 사이의 값이 많은 영역에 분포하고 있다 (Fig. 7). 분포지도의 우하단은 평

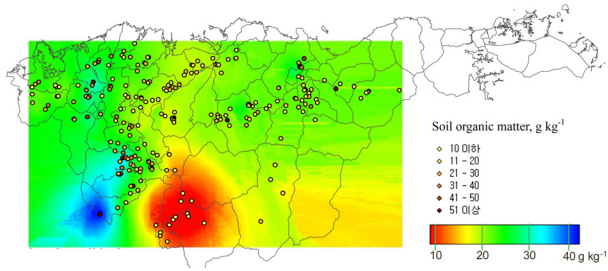


Fig. 7. Distribution map of measured soil organic matter contents at Cheolwon.

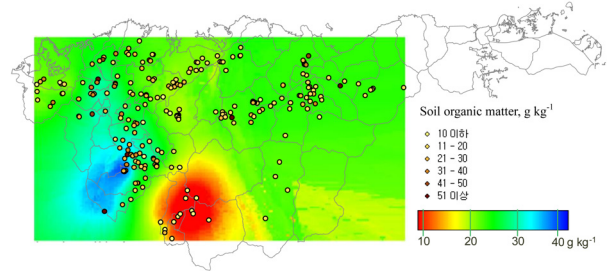


Fig. 8. Distribution map of estimated soil organic matter contents at Cheolwon.

균치보다 낮은  $16 \text{ g kg}^{-1}$  정도의 값이 분포하는 것으로 나타나고 있는데 이는 주어진 자료의 값이 그 부근에서 그 정도의 값을 가지고 있고 또 상대적으로 제한된 자료가 주어졌기 때문으로 보인다 (Fig. 7). 추정값을 이용한 크리깅 결과는 실측값을 이용한 분포지도와 유사한 공간적 패턴을 나타내었다 (Fig. 8). Figure 7의 실측값 지도에서 우하단부와 중앙 부분의 유기물 함량이  $16 \text{ g kg}^{-1}$  정도인 노란색 부분이 Figure 8의 추정값을 이용한 분포지도에서는 약간 더 높은 값을 나타내는 경향을 보였는데 이는 토양 유기물 추정식에 의한 추정치와 실측치 간의 오차에 의한 것으로 판단된다.

## 요 약

본 연구에서는 토양의 가시·근적외선 스펙트럼의 피크중첩에 의한 분석오차를 감소시킴으로써 토양유기물 추정의 정확도 향상을 위해 이산 웨이블릿 변환 (DWT) 신호처리 기법의 적용을 검토하고 공간정보모델링을 통해 토양유기물의 분포도를 작성하고자 하였다. 토양유기물 함량에 따른 스펙트럼의 정량적 변화의 강조를 위해 Continuum 제거, 도함수 변환과 함께 Haar, Daubechies DWT 변환된 스펙트럼을 PLSR 모델에 대입하여 산출한 토양유기물 추정식들은 거의 비슷한 결과를 도출하였고  $R^2 > 0.6$ ,  $RPD > 1.5$  의 '대략적인' 추정 결과를 보였다. 잡음을 줄이고 신호값을 향상시키기 위해 이산 웨이

블릿 변환을 적용한 결과에서 오히려 약간 낮은 성능을 나타내었는데 성긴 근사값 (Coarser approximation) 스펙트럼으로 변환되어 추정식의 유의성이 낮아졌을 가능성이 있다. 따라서 토양의 분광스펙트럼에 더 적합한 이산 웨이블릿 필터와 수준 등의 DWT 조건을 찾고 적용함으로써 추정식의 유의성을 향상시킬 수 있을 것으로 본다. 또한, 유기물에 의한 에너지의 흡수, 반사를 일으키는 주요 파장대의 상관성을 분석하여 선택적으로 해당 영역의 스펙트럼이나 파라미터 값을 산출하여 추정모델에 적용하는 시도도 필요할 것으로 사료된다. 이러한 토양 유기물의 추정값과 실측값을 이용해 구역 크리깅을 수행하여 분포도를 작성하였다. 토양 샘플의 유기물 분석값은 평균값을 중심으로 정규분포를 나타내었는데 크리깅 지도에서도 전반적으로 유사한 패턴의 값이 분포하였다. 추정값을 이용한 크리깅 결과도 실측값을 이용한 분포지도와 유사한 공간적 패턴을 나타내었다. 지도의 우하단부와 중앙 부분에서 실측값 분포보다 추정값 분포지도에서 약간 더 높은 경향을 보였는데 이는 토양 유기물의 추정치와 실측치 간의 오차에 의한 것으로 판단된다. 분광 스펙트럼을 이용한 추정 모델은 정확도 제고가 필요한 단계이나 신속성, 용이성 면에 있어서 토양 특성에 대해 광역 단위에서 다량의 시료 분석에 유용할 것으로 보이고, 또한 지역, 세계 규모의 디지털 토양 매핑, 토양 분류 및 원격탐사 자료와의 연계 분석에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 인 용 문 헌

Ben-Dor, E. and A. Banin. 1995. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *SSSAJ*. 59:364-372.

Ben-Dor, E., J.R. Irons, and G.F. Epema. 1999. Soil reflectance. In A.N. Rencz (Ed.), *Remote sensing for the earth sciences: Manual of remote sensing* (pp. 111-188). New York: John Wiley & Sons.

Chen, M., B. Glaz, R.A. Gilbert, S.H. Daroub, F.E. Barton, and Y. Wan. 2002. Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of phosphorous in sugarcane leaves. *Agron. J.* 94:1324-1331.

Chen, Z., P.J. Curran, and J.D. Hansom. 1992. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. *Remote Sens. Environ.* 40:67-77.

Cho, S.I., Y.M. Bae, H.S. Yang, and S.H. Choi. 2001. Measurement of soil organic matter using near infra-red reflectance. *Korean Society for Agricultural Machinery* 26:475-480.

Choe, E., F. van der Meer, F. van Ruitenbeek, H. van der Werff, B. de Smeth, and K.W. Kim. 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 Sens. Environ.* 112:3222-3233.
- Choe, J.K. 2004. Spatial Data Medeling: Kriging and optimization (pp. 127-163). Goomi.
- Curran, P.J. 1989. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sens. Environ.* 30:271-278.
- Farifteh, J., F. van der Meer, C. Atzberger, and E.J.M. Carranza. 2007. Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: A comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN). *Remote Sens. Environ.* 110:59-78.
- Ferrier, G. 1999. Application of imaging spectrometer data in identifying environmental pollution caused by mining at Rodaquilar, Spain. *Remote Sens. Environ.* 68:125-137.
- Ge, Y., C.L.S. Morgan, J.A. Thomasson, and T. Waiser. 2007. A new perspective to near-infrared reflectance spectroscopy: a wavelet approach. *Trans. ASABE* 50: 303-311.
- Isaaks, E.H. and R.M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Pressure, Oxford.
- Jensen, J.R. 2000. Remote sensing of the environment: An Earth Resource Perspective. Prentice Hall.
- Kemper, T. and S. Sommer. 2002. Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy. *Environ. Sci. Technol.* 36:2742-2747.
- Kim, H.J. 1995. Waveform analysis using wavelet transform. *Econ. Environ. Geol.* 28:527-534.
- Misiti, M., Y. Misiti, G. Oppenheim, and J. Poggi. 1996. Wavelet Toolbox for use with MATLAB: User's Guide ver. 1.
- Misman, M.A., H.Z.M Shafri, and R.M. Kamil Raja Ahmad. 2010. Effects of hyperspectral data transformations on urban inter-class separations using a support vector machine. *Journal of Applied Sciences* 10:2241-2250.
- NIAST. 2000. Methods of soil and crop plant analysis. National Institute of Agricultural Science and Technology. Suwon, Korea.
- Pieters, C.M. and P.A.J. Englert (Ed.). 1993. Remote geochemical analysis: Elemental and mineralogical composition (pp. 43-77). Cambridge University Press.
- Thomasson, J.A., R. Sui, M.S. Cox, and A. Al-Rajehy. 2001. Soil reflectance sensing for determining soil properties in precision agriculture. *Trans. ASAE* 44:1445-1453.
- van der Meer, F. 2006. Indicator Kriging applied to absorption band analysis in hyperspectral imagery: A case study from the Rodalquilar epithermal gold mining area, SE Spain. *Int. J. Earth Observ. Geoinfo.* 8:61-72.
- Williams P.C. 2001. Implementation of near infrared technology. In P.C. William, K.H. Norris (Eds.), *Near-Infrared Technology in the Agriculture and Food Industries* (pp. 145-171). St. Paul, Minnesota: Am. Assoc. of Cereal Chemists.