

정밀농업을 위한 토양의 실시간 이화학 성분 분석 기술 개발

윤현웅¹ · 최창현¹ · 김용주² · 홍순중^{3*}

¹성균관대학교 생명공학부, ²충남대학교, ³농촌인전자원개발센터

Development of real-time chemical properties analysis technique in paddy soil for precision farming

Hyun-Woong Yun¹, Chang-Hyun Choi¹, Yong-Joo Kim², Soon-Jung Hong^{3*}

¹School of life Science and Biotechnology, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea,

²Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

³Rural Development Administration Rural Human Resource Development Center, Suwon 441-853, Korea

Received on 3 March 2014, revised on 19 March 2014, accepted on 21 March 2014

Abstract : Precision farming aims at reduced environmental impacts with increased productivity. Soils are multi-functional media in which air, water and biota occur together and form an essential part of the landscape with a fundamental role in the environment. The requirement for herbicides and fertilizers can vary within a field in response to spatial differences in soil properties. Near infrared (NIR) spectroscopy is widely used today as a nondestructive analytical technique which is capable of determining a number of physio-chemical parameters. The objectives of this study were to develop optimal models to predict chemical properties of paddy soils by visible and NIR reflectance spectra. Total of 60 soil samples were collected in spring from 20 paddy fields within central regions in Korea. Reflectance spectra, moisture contents, pH, total nitrogen (N), organic matter, available phosphate (P₂O₅) of soil samples were measured. The reflectance spectra were measured in wavelength ranges of 400-2,500 nm with 2 nm interval. The method of partial least square (PLS) analysis was used to determine the soil properties. The PLS analyses showed good correlation between predicted and measured chemical properties of paddy soils in the wavelength range of 1,800-2,400 nm. Especially, it showed better performance than the previous results which used the entire wavelength range of the spectrophotometer, without considering the optimal wavelength of each soil properties.

Key words : Precision farming, Soil properties, Paddy soil, Reflectance spectra, Near-infrared

I. 서론

정밀농업은 IT 등의 발전된 현대의 첨단기술을 농업생산에 접목하여 활용하는 기술로서 토양의 특성, 작물의 생육 상태 파악, 그리고 수량과 수분함량 등을 정밀 조사하여 적량의 시비처방과 농약살포 등을 시행한다. 이러한 정밀농업은 국소적 변이를 고려하여 농약 및 비료 등의 양을 조절하므로 생산 비용을 절감할 수 있으며, 농약의 남용을 막아 환경오염을 줄일 수 있다(Park, 2010).

정밀농업의 국소적 처방을 위해서는 경작지 내 토양 성

분 변이를 파악해야한다. 현재 토양의 성분분석은 농촌진흥청에서 고시한 “토양 및 식물체 분석법”에 따라 포장 내 토양 샘플을 채취하여 3-5일간 건조한 토양에 대하여 각 성분에 따라 다른 분석법을 사용한다(Park, 2000). 이러한 이화학적 분석법은 오랜 시간이 소요되며 전문적인 인력을 필요로 하기 때문에 기온, 날씨 등의 환경변화에 민감한 토양을 실시간으로 분석하기에는 어려운 실정이다. 이에 반해 근적외선 분광분석법은 화학적 전처리 없이 현장에서 실시간으로 비파괴적 검사가 가능하고 비교적 사용방법이 간단하여 많은 연구가 이루어지고 있다(Choi et al., 2012).

토양 시료에 대한 가시광선 영역 및 근적외선 영역의 스펙트럼 측정은 오래전부터 시도되었다. Bower and Hanks

*Corresponding author: Tel: +82-31-238-9374

E-mail address: hsj43333@korea.kr

(1965)는 토양의 수분함량과 입자 크기, 유기물 함량에 대한 스펙트럼의 영향을 조사하였으며 Krishnan 등(1980)은 토양의 가시광선-근적외선 스펙트럼을 측정하여 수식화한 토양 유기물 함량 정량법을 보고하였다. 그 이후 cation exchange capacity (CEC), Ca, K, MG, pH, 총 질소 등 다양한 토양의 성분을 가시광선-근적외선을 통해 분석하여 높은 상관관계를 밝혀내었지만(Sudduth and Hummel, 1993; Islam et al., 2003; Lee et al., 2009) 토양을 채취하여 건조시킨 후 가시광선-근적외선을 측정하는 방법으로 실험실에서의 성분분석에 그치고 있는 실정이다.

Cho 등(2001)은 토양의 입자 크기와 함수율을 조절하여 제조한 시료에 근적외선-가시광선 반사스펙트럼을 측정하여 실제 포장의 토양을 건조시키지 않더라도 토양의 유기물 함량을 예측할 수 있다는 가능성을 보여주었으나 아직까지 자연 상태 토양의 예측모델 개발에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 토양의 실시간 성분분석 시스템 개발을 위한 기초연구로써 자연 상태 토양의 가시광선-근적외선 스펙트럼을 측정하고 광학적 특성을 구명하였으며, 토양의 이화학성에 따른 최적 파장영역을 선정하여 예측모델을 개발 및 검증하였다.

II. 재료 및 방법

1. 토양시료

토양 시료는 2012년 5월에 경기도, 충청도에서 20개의 지역을 선정하여 3일에 걸쳐 채취하였다. 토양시료 채취는 지역별 3개 구간의 논토양을 선택하였으며, 동일 포장이라

도 토양 비옥도의 불균일을 고려하여 20지점의 토양을 채취한 후 하나의 시료로 사용하는 방식으로 총 60개의 토양 시료를 확보하였다. 또한 토양 시료는 자연 상태의 토양과 건조를 위한 토양 시료로 분리 하였으며, 토양 건조는 농촌진흥청 토양 건조실에서 7일간 풍건하여 시료에 포함된 굵은 덩어리나 자갈을 골라내기 위해 선별하였다. 토양의 성분측정은 건조된 토양 시료를 2 mm 체눈으로 선별하여 pH, 질소, 인산, 유기물, 수분 함량을 측정하였다. 토양의 pH는 pH-meter (F390, Beckman Coulter, USA)를 이용하여 측정하였고, 질소는 Kjeldhal법을 이용하여 측정하였다. 인산은 Lancaster법으로 유기물은 Tyurin법으로 측정하였고, 토양의 수분 함량은 자연 상태의 토양 시료를 10 5°C에서 18시간 이상 건조시켜 건조토양의 무게를 측정하여 중량수분 함량(%)으로 토양의 수분 함량을 측정하였다 (Park, 2000).

2. 스펙트럼 측정

토양 샘플의 스펙트럼은 Fig. 1과 같은 고성능 분광분석기(Foss 6500, NIR System, USA)의 horizontal 모듈과 토양을 담기위한 셀 그리고 반사판을 이용하여 400-2,498 nm의 파장영역에서 2 nm 간격으로 측정하였다. 반사스펙트럼은 기준(reference) 스펙트럼을 측정하고 셀에 자연 상태의 토양 시료를 고르게 펴서 토양 입자간의 공극을 제거하기 위하여 약 3.5 kPa의 일정한 압력을 주어 측정하였다(Cho et al., 2001). 이때 샘플 셀은 광 투과성이 우수한 수정을 이용하여 제작하였으며, 반사판은 평면을 고르게 정밀 가공한 후 반사율을 높이기 위해 금으로 도금하였다 (Son et al., 2009).



Fig. 1. Sample cell, reflectance plate (left) and horizontal type spectrophotometer (right) for reflectance spectra measurements.

3. 예측모델 개발

토양 시료의 성분에 대한 예측모델을 개발하기 위해 전체 스펙트럼의 50%를 교정부로, 나머지 50%를 검증부로 분류하였다. 스펙트럼은 각각의 토양 성분에 대해 크기 순서로 정렬한 후에 순차적으로 교정부와 검증부로 분류하여 교정부와 검증부가 유사한 크기와 범위를 갖도록 조정하였다. 예측모델은 다양한 화학적 성분조성을 갖는 시료 분석에 적합한 부분최소자승법(Partial Least Square, PLS)을 이용하여 토양 시료의 스펙트럼과 성분과의 상관관계를 분석하였으며, 분석은 상용 프로그램인 Unscrambler (version 9.7, Camo, Norway)를 사용하였다. 부분최소자승법은 식 (1), 식 (2), 식 (3)과 같이 주성분분석으로 독립변수와 종속변수를 주성분 벡터(principle component vector)와 스코어 벡터(score vector)로 각각 분해하여 종속변수의 예측모델을 개발하는 통계적 기법으로 주성분 분석 시 독립변수와 종속변수의 정보를 동시에 이용함으로써 종속변수의 크기에 따라 독립변수에 가중치 부여가 가능한 장점이 있다(Choi et al., 2012). 예측모델은 400–2,500 nm 영역에서 100 nm 간격으로 모델을 개발한 후, 서로 조합하는 방법을 반복하여 각각의 토양성분에 대한 예측 모델을 개발하였다. 개발된 모델의 신뢰성을 높이기 위해 교차검증(cross validation)을 이용하였으며, 주성분(Principal Component, PC) 수가 클수록 과적합(overfitting)이 발생하여 예측모델의 신뢰성이 떨어지므로 최대 주성분은 20으로 설정하고(Choi et al., 2008) 각각의 주성분에 대한 결정계수(r^2)와 교정부 오차(Standard Error of Calibration, SEC)를 비교하여 최적 모델을 선정하였다. 이때, 개발된 모델의 예측성능을 검증하기 위해 검증부 결정계수, 검증부 오차(Standard Error of Prediction, SEP)를 이용하였는데, 검증부 결정계수는 0.66 미만, 0.66–0.81, 0.82–0.90,

0.91 이상의 범위에 대해 각각 상관관계가 낮음(poor), 유의함(approximate), 높음(good), 우수함(excellent)을 의미한다(Martens and Naes, 1984).

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

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

$$B = T^{-1}(U - H) \tag{3}$$

- X : 토양 스펙트럼 Y : 토양의 이화학성분
- T : X의 스코어 벡터 U : Y의 스코어 벡터
- P : X의 주성분 벡터 Q : Y의 주성분 벡터
- B : 예측모델 E, F, H : 잔차

III. 결과 및 고찰

1. 토양의 성분분석

Table 1은 실험에 사용한 토양 시료의 이화학적 데이터를 나타내고 있다. pH는 평균 6.3로 논토양의 적정 범위인 6–6.5 사이로 나타났으며, 식물체를 구성하는 단백질이나 핵산 등의 질소화합물을 만드는 원료로서 매우 중요한 성분인 질소는 평균 0.12%로 측정되었다. 인산은 평균 89 mg/kg으로 부족한 경우 식물체의 아랫잎이 녹자색으로 변하고 심하면 상위 어린잎까지 진전되는데 95년 이후, 연간 2~3회의 화학비료 사용으로 토양 중 인산성분이 과다하게 축적되어 지하침투에 의한 수질오염원이 되고 있다. 유기물은 평균 8 g/kg으로 논토양의 적정 범위인 20~30 g/kg에 미치지 못해 유기물 부족현상을 보이고 있다. 토양에서 수분 함량은 식물의 생육에 영향을 미치며, 평균 15.5%로 측정되었다.

Table 1. Chemical properties of soil tested.

(N=60)

	Avg.	Max.	Min.	Std.
pH	6.3	6.5	5.6	0.2
Total-Nitrogen (%)	0.12	0.14	0.07	0.02
P ₂ O ₅ (mg/kg)	89	180	47	25
Organic Matter (g/kg)	8	10	3	2
Moisture Contents (%)	15.5	23.2	4.1	5.8

2. 스펙트럼 측정

토양 시료에 대한 스펙트럼 측정 결과는 Fig. 2와 같이 500 nm, 1,400 nm, 1,900 nm, 2,200 nm에서 피크를 나타냈다. 가시광선 영역에서의 피크는 토양의 색에 의해 다르게 나타났는데 토색은 Fe 함량에 영향을 많이 받는다고 보고되었다(Ben-dor et al., 1995). 근적외선 영역 중 1,400 nm와 1,900 nm 영역은 O-H 결합과 지방족 C-H 결합에 의해 나타난다고 알려져 있고(Fidencio et al., 2002), 2,200 nm 영역은 phenolic O-H, amide N-H, amine N-H, 그리고 aliphatic C-H에 의해 나타난다(Cozzolino and Moron, 2003). 그러나 가시광선-근적외선 스펙트럼의 경우 각 화학결합이 중첩(overtone)의 영향에 의해 나타나므로 PLS와 같은 다중회기분석을 통하여 토양성분에 대한 예측모델을 개발하였다.

3. 예측모델의 개발

토양 시료의 가시광선-근적외선 스펙트럼을 이용하여 토양의 이화학적 성분을 예측할 수 있는 PLS 모델을 개발한 결과는 Table 2와 같다. 교정부 30개의 시료를 이용하여 만든 모델은 모든 토양 성분에 대하여 결정계수 0.8 이상의

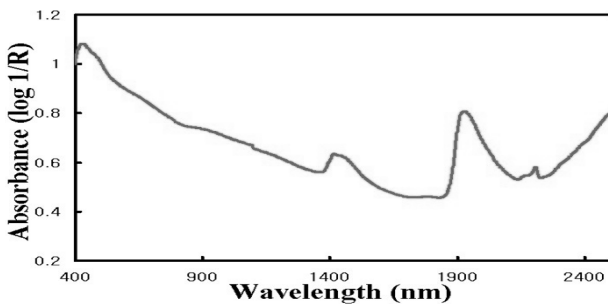


Fig. 2. Representative visible-NIR absorbance spectra of a natural soil sample.

높은 결과를 나타내었다. 특히 유기물 함량과 수분함량에 대해서는 결정계수 0.96의 우수한 예측 성능을 보이고 있어 스펙트럼을 이용한 건조하지 않은 상태 토양의 성분 분석 가능성을 예측할 수 있었다.

자연 상태 토양의 pH는 1,900-2,100 nm영역에서 가장 좋은 상관관계를 보였으며, 검증결과는 상관계수 0.80, 검증부 오차 0.12로 Ryu 등(2001)이 보고한 건조된 토양의 상관계수 0.79와 유사한 예측결과를 보이고 있어 pH의 예측이 가능함을 보이고 있다. 질소 함량의 상관관계는 2,000-2,300 nm에서 가장 높았으며, 결정계수와 오차가 각각 0.89, 0.01%로 건조된 토양의 상관계수 0.95보다 낮게 나타났지만 높은 예측 결과를 보여주었다. 인산의 함량은 2,200-2,400 nm 영역에서 상관계수는 0.72, 검증부 오차는 16.98 mg/kg으로 낮게 나타났지만 Chung 등(2011)의 예측결과 0.59에 비하여 크게 향상되었다. 유기물 함량은 1,800-2,100 nm의 영역에서 가장 좋은 상관관계를 나타냈으며, 검증부 계수는 0.72, 검증부 오차는 1.43 g/kg으로 Ryu 등(2001)이 보고한 건조된 토양의 검증결과 0.96에 비해 낮게 나타나 스펙트럼의 전처리 등을 이용한 성능 개선이 필요함을 알 수 있다. 토양의 수분 함량은 1,800-2,200 nm에서 결정계수와 검증부 오차가 각각 0.92, 2.16%로 가장 높은 상관관계를 보이고 있어 모델이 수분 함량의 예측이 가능함을 보여주고 있다.

교정부 예측결과에서는 결정계수 0.96으로 우수한 성능을 나타냈었던 유기물 함량 예측모델이 검증부 검증 결과에서 결정계수 0.72로 낮게 나타난 것은 1,800-2,100 nm의 비교적 넓은 파장 범위를 이용하였기 때문에 화학결합의 중첩에 의한 왜곡 및 잡음에 의한 변화가 증폭되었기 때문이라 판단되었다. 반면 수분함량은 1,800-2,200 nm로 유기물 함량보다 넓은 범위의 파장영역을 사용하지만 수분에 대한 피크는 1,900 nm 영역에서 비교적 명확하게 나타나 중첩 현상에 의한 왜곡이 적어서 높은 검증결과를 유지한 것으로 판단

Table 2. PLS Results for soil properties of paddy field.

Property	Wavelength (nm)	Calibration			Prediction	
		PC	R ²	SEC	R ²	SEP
pH	1,900-2,100	4	0.87	0.11	0.80	0.12
Total Nitrogen (%)	2,000-2,300	4	0.88	0.01	0.89	0.01
P ₂ SO ₄ (mg/kg)	2,200-2,400	6	0.83	12.58	0.72	16.98
Organic matter (g/kg)	1,800-2,100	5	0.96	0.50	0.72	1.43
Moisture Contents (%)	1,800-2,200	8	0.96	1.49	0.92	2.16

되었다. 토양의 이화학적 성분에 대한 예측모델을 검증한 결과, 인산과 유기물의 모델이 모두 결정계수 0.72로 다소 낮은 결정계수를 보여 주었으나 기존 연구와 달리 자연 상태 토양에 대한 예측모델인 점을 고려할 때, 향후 토양의 실시간 품질 측정에 활용이 가능함을 알 수 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 정밀농업을 위한 토양의 실시간 성분분석 기술 개발을 위한 기초연구로서 자연 상태 토양의 가시광선-근적외선 스펙트럼을 측정하였고, 스펙트럼의 광학적 특성을 구명하여 최적의 파장영역을 선정하고 토양 성분의 예측모델을 개발 및 검증하기 위하여 수행되었다. 스펙트럼은 20개 지역의 토양 시료 60점을 측정하였고 예측모델은 부분최소자승법을 이용하여 개발하였다.

토양 성분을 분석한 결과 함량 범위와 평균은 pH가 각각 5.6-6.4, 6.1이었으며 질소는 각각 0.07-0.14%, 0.11%로 나타났다. 그리고 인산의 함량 범위와 평균은 48-175 mg/kg, 96 mg/kg, 유기물은 각각 3-9 g/kg, 7 g/kg, 수분 함량은 4.7-21.2%, 14.2%로 유기물 부족현상을 제외하고는 대부분 적정범위 이내를 만족하였다.

다중회귀분석의 부분최소자승법을 이용하여 개발된 토양 성분 예측모델은 유기물 함량을 제외하고 대부분 근적외선 영역에서 기존 연구에 비해 우수한 상관관계를 보여주었다. 이에 따라 실제 포장의 토양을 건조시키거나 선별하지 않고 토양의 이화학적 성분 분석이 가능함을 보여주고 있다. 그러나 유기물의 경우는 검증부 결정계수가 0.72로 건조된 토양의 예측모델의 결정계수 0.96에 비해 낮게 나타나 예측모델이 유기물 함량을 예측하기 어려운 것으로 나타났다. 이는 넓은 범위의 파장영역을 이용한 예측모델로 화학결합의 피크에 대한 중첩 오차가 커져서 나타나는 것으로 판단되었다. 그러므로 현장적용을 위해서는 수학적 전처리를 통해 스펙트럼의 노이즈 및 산란 효과를 제거하고 다양한 알고리즘 적용을 통해 성능향상이 필요할 것으로 판단되었다.

참고 문헌

Ben-Dor E, Banin A. 1995. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal* 59:364-372.
 Bower SA, Hanks RJ. 1965. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*. 100:130-138.

Cho RK, Kim BJ, Park WC, Ryu KS. 2001. Use of NIR soil analyzer for measuring chemical properties of field soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 34:278-283.
 Choe EY, Hong SY, Kim YH, Zhang YS. 2010. Estimation and Mapping of Soil Organic Matter using Visible-Near Infrared Spectroscopy. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 43:968-974.
 Choi CH, Kim YJ, Kim KS, Choi TH. 2008. Development of Measuring Technique for Somatic Cell Count in Raw Milk by Spectroscopy. *Journal of Biosystems Engineering* 33:210-215.
 Choi CH, Yun HW, Kim YJ. 2012. Development of measuring technique for milk composition by using visible-near infrared spectroscopy. *Korean Journal of Food Preservation* 19:95-103.
 Chung SO, Jung KY, Sudduth KA. 2011. Estimation of Korean Paddy Field Soil Properties Using Optical Reflectance. *Journal of Biosystems Engineering* 36:33-39.
 Cozzolino D, Moron A. 2003. The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyze soil chemical and physical characteristics. *The Journal of Agricultural Science* 140:65-71.
 Fidencio PH, Poppi RJ, Andrade JC, Cantarella H. 2002. Determination of organic matter in soil using near-infrared spectroscopy and partial least squares regression. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 33:1607-1615.
 Islam K, Singh B, McBratney A. 2003. Simultaneous estimation of several soil properties by ultra-violet, visible and near-infrared reflectance spectroscopy. *Australian Journal of Soil Research* 41:1101-1114.
 Krishnan P, Alexander JD, Butler BJ, Hummel JW. 1980. Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 44:1282-1285.
 Karoui R, Mouazen AM, Dufour E, Pillonel L, Picque D, Bosset JO, Baerdemaeker JD. 2006. Mid-infrared spectrometry: A tool for the determination of chemical parameters in emmental cheeses produced during winter. *Lait* 86:83-97.
 Lee KS, Lee DH, Sudduth KA, Chung SO, Kitchen NR, Drummond ST. 2009. Wavelength identification and diffuse reflectance estimation for surface and profile soil properties. *Transactions of the ASABE* 52:683-695.
 Martens H, Naes T. 1984. Multivariate calibration. I. Concepts and distinction. *Trends in Analytical Chemistry* 13:204-210.
 Park DY. 2010. Economical efficiency analysis for introduction of the precision agriculture. Ph.D. dissertation, Chonbuk National Univ., Jeonju, Korea. [in Korean]
 Park MU. 2000. Soil and Plant Analysis. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
 Ryu KS, Cho RK, Park WC, Kim BJ. 2001. Use of NIR soil analyzer for measuring chemical properties of field soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 34:278-283.
 Son JR, Kang SW, Lee KJ, Seo YW, Yang GM. 2009. Development of prediction model for sugar content of strawberry using nir spectroscopy. *Food Engineering Progress* 13:297-301.
 Sudduth, KA, Hummel JW. 1993. Soil organic matter, CEC, and moisture sensing with a portable NIR spectrophotometer. *Transactions of the ASAE* 36:1571-1582.