한국농업기계학회 2006 동계 학술대회 논문집 11(1):93-97

반사 스펙트럼을 이용한 논 토양의 이화학성 측정

Prediction of Chemical Properties of Paddy Soils by Reflectance Spectra

김용주* 정회원 Y.J.Kim | 최창현* 정회원 C.H.Choi | 김종혁* 정회원 J.H.Kim | 남은혜* 정회원 E.H.Nam | 김유학** Y.H.Kim

1. 서론

농업에서 농약과 비료의 사용은 단시간내에 농작물의 생산성 극대화, 노동력 절감, 효율적 병해충 방제 등의 이점이 있는 반면에 오용(誤用)하게 되면 환경오염을 수반하므로 논 토양의 이화학적 상태에 따른 화학 비료의 사용과 적절한 농약의 투입량 조절이 필요하다. 이를 위해서는 토양 또는 작물단위로 토양의 이화학적 특성을 각 작물의 재배시기 마다 분석할 필요가 있다. 현재 사용되고 있는 토양의 이화학적 분석방법은 농촌진흥청에서 고시한 "토양 및 식물체 분석법"에 따라 포장내 토양의 샘플을 채취하여 3~5일간 건조한 토양을 2mm의 체눈을 이용하여 선별한 후 각각의 성분에 따라 다른 분석법으로 복잡한 절차를 거쳐야 하므로 많은 시간이 소요되며, 분석중에 사용되는 화학 시료 등의 분석 폐기물에 인해 공해를 유발하고 전문인력을 필요로 하는 등의 단점을 가지고 있어 이를 대체할 수 있는 센서의 개발을 필요로 하고 있다.

근적외선 분광법은 시료 외부에서 빛을 투과 혹은 반사시킬 때의 에너지 변화를 측정하여 시료 내·외부의 이화학적 성분을 측정하는 방법으로 전처리가 필요 없고, 신속한 측정으로 전량검사가 가능하며, 하나의 스펙트럼으로 여러 가지 성분분석이 가능하여 농산물의 선별 시스템이나 토양의 이화학적 성분검사에 사용되고 있다. 캐나다에서는 토양의 질소량 측정에서 유독 약품의 소모가 많은 Kjeldahl법의 사용을 금지하고 대안으로 근적외선 분광법을 장려하고 있으며, 내수면 퇴적지의 이화학성을 근적외선 분광법으로 측정하는 등 환경지도 분야에 다양하게 활용하고 있다. 또한 일본에서도 근적외선 분광법을 이용하여 토양 이화학성 분석성적을 생산농가의 지도용으로 활용할 준비단계에 있으며, 일본 전체를 관리할 수 있는 검량식과 실용화 비파괴장치 개발이 활발히 진행되고 있는 실정이다. 국내의 토양의 성분측정에 관한 연구는 주로 포장에서 토양샘플을 채취하여 건조한 토양을 선별한 후에 근적외선 분광법을 이용하여 예측 모델을 개발하고 있다. 그러나 이러한 방법은 기존에 사용되고 있는 이화학적 방법에 비하여 시간이 단축된다는 장점은 있으나, 건조 및 선별 작업 등에 인하여 토양 시료를 현장에서 실시간 측정할 수 없다는 단점이 있다.

그러므로 본 연구는 실시간 토양의 이화학적 성분 측정을 위한 기초 연구로서, 근적외선 분광분석법을 이용하여 포장에서 채취한 자연상태의 토양 시료와 건조한 토양 시료의 광학적 특성을 구명하고, 토양내의 pH, 질소, 인산, 유기물, 양이온(칼슘, 칼륨, 마그네슘, 나트륨), 수분 함량을 예측할 수 있는 모델을 개발하여 토양의 상태에 따라 농약 및 비료의 투입을 결정하는데 필요한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

* 성균관대학교 생명공학부 ** 농촌진흥청 농업과학기술원

† 이 논문은 2005년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음.(KRF-2003-005-F00007)

2. 재료 및 방법

가. 성분분석

토양 시료는 2005년 5월에 경기도, 충청도 강원도의 20개의 지역을 선정하여 3일에 걸쳐 채취하였다. 선정된 하나의 지역에 대하여 임의로 3개의 논 토양을 선택하여 토양 시료를 채취하였으며, 동일 포장내에서도 부위에 따라 토양 비옥도가 불균일하므로 20~30 지점의 토양을 채취하여 하나의 시료로 사용하는 방식으로 총 60개의 토양 시료를 확보하였다. 또한 토양 시료는 자연상태의 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 2mm 체눈으로 선별하여 pH, 질소, 인산, 유기물, 양이온(칼슘, 칼륨, 마그네슘, 나트륨), 수분 함량을 측정하였다. 토양의 pH는 토양과 물의 비율을 1:5로 하여 pH buffer용액을 표준용액으로 하고 pH-meter(F390, Beckman Coulter, USA)를 이용하여 측정하였고, 질소는 분해용 전기로에서 4시간동안 400℃의 고열로 가열하여 분해한 후, Kjeldhal 증류장치를 이용하여 증류하고 H_2SO_4 표준용액으로 적정하여 청색에서 핑크색이 나타나는 점을 종말점으로 하는 Kjeldhal법을 이용하여 측정하였다. 인산은 결합하고 있는 금속을 산 또는 NH_4F 용액으로 용해하여 착화합물을 형성시킴에 따라서 인산을 분리시키는 Lancaster 법을 이용하여 측정하였고, 유기물은 강력한 산화제인 $K_2Cr_2O_7$ 용액으로로 산화시키고 소모된 산화제의 양으로부터 알아낸 탄소 함량에 탄소 함량 비를 곱하여 부식의 양으로 측정하는 방법인 Tyurin법으로 측정하였다. Na, Ca, K, Mg의 치환성 양이온은 원자흡광분광광도계(ICP-Integra XMP, Gbc, Australia)를 이용하여 측정 하였으며, 토양의 수분 함량은 자연상태의 토양 시료를 105℃에서 18시간 이상 건조시켜 건조토양의 무게를 측정하여 중량수분 함량(%)으로 토양의 수분 함량을 측정하였다.(토양 및 식물체 분석법. 1997. 농촌진흥청)

나. 스펙트럼 측정

토양의 광학적 특성을 구명하기 위하여 각각 60점의 자연상태 토양과 건조한 토양 시료를 분광분석기(Model 6500, NIRSystem, USA)와 Horizontal 모듈을 이용하여 400~2498nm의 파장영역에서 2nm간격으로 스펙트럼을 측정하였다. 이때 토양 시료의 투과 거리를 고려하여 토양을 직경 50mm의 셈플 셀에 담고 토양 입자간의 공극을 제거하기 위하여 약 3.5kPa의 일정한 압력을 주어 측정하였으며, 각각의 토양 시료에 광선을 32회 주사하여 측정한 스펙트럼을 평균내어 흡광도(log(1/R))로 변환한 스펙트럼을 컴퓨터의 파일로 저장하였다.

다. 예측모델의 개발

스펙트럼을 이용한 예측모델은 자연상태 토양과 건조한 토양 시료에 대하여 각각 개발하였으며, 전체 스펙트럼의 50%를 교정부로, 50%를 검증부로 분류하였고, 부분최소자승법(Partial Least Squares, PLS)을 이용하여 토양 시료의 성분과 스펙트럼과의 상관관계를 분석하였다. PLS 분석은 상용 프로그램인 Unscrambler (Camo, Norway)를 사용하였으며, 각 성분의 예측모델을 개발하기 위해서 원시 스펙트럼과 분할간격(Gap) 및 평활화 간격을 변화시킨 1차 및 2차 미분 스펙트럼을 사용하였다.

PLS 모델은 교차검증을 이용하여 개발하였으며, 팩터의 수와 PRESS 값을 참조하고 상관계수(R)와 교정부 오차(SEC)를 비교하여 선정하였다. 팩터의 수가 증가하면 PRESS 값은감소하나 팩터의 수가 너무 많으면 검증 시 예측능력이 떨어지므로 F-검증을 수행하여 검증의 확률이 0.75미만이 되는 팩터의 수를 모델의 최적 팩터의 수로 결정하였다. 최적의 PLS 모델은 상관계수, 교정부 오차, 팩터의 수를 고려하여 선정하였고 각 모델의 예측 성능은 검증부 오차(SEP), 편차(Bias)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 토양의 성분분석

표 1은 실험에 사용한 토양 시료의 이화학적 데이터를 나타내고 있다. pH는 평균 6.1pH로 논 토양의 적정 범위인 6~6.5pH 사이로 나타났으며, 식물체를 구성하는 단백질이나 핵산 등의 질소화합물을 만드는 원료로서 매우 중요한 성분인 질소는 평균 0.11%로 측정되었다. 인산은 평균 96mg/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 7g/kg으로 논 토양의 적정 범위인 20~30g/kg에 미치지 못해 유기물 부족현상을 보이고 있다. K, Ca, Mg, Na의 양이온은 각각 평균 0.57cmol$^+$/kg, 5.51cmol$^+$/kg, 0.4cmol$^+$/kg, 0.35cmol$^+$/kg으로 비료성분으로 토양에 첨가되는 양이온 성분이 토양에 흡착될 수 있는 용량을 의미하며 비료 사용량을 결정하는 기준으로 사용된다. 토양에서 수분 함량은 식물의 생육에 영향을 미치며, 평균 14.2%로 측정되었다.

Table 1 Chemical properties of soil tested.

	pH	T-N (%)	P_2O_5 (mg/kg)	O.M. (g/kg)	Ex.K (cmol$^+$/kg)	Ex.Ca (cmol$^+$/kg)	Ex.Mg (cmol$^+$/kg)	Ex.Na (cmol$^+$/kg)	M.C. (%)
N	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Ave.	6.1	0.11	96	7	0.57	5.51	0.4	0.35	14.2
Max.	6.4	0.14	175	9	1.19	6.43	0.5	0.53	21.2
Min.	5.6	0.07	48	3	0.33	3.89	0.3	0.18	4.7
St.Dev.	0.2	0.02	23	2	0.19	0.41	0.03	0.09	5.5

※ O.M. : Oganic Matter M.C. : Moisture Contents

나. 예측모델의 개발

자연상태의 토양과 건조된 토양의 광학적 특성을 구명하기 위하여 가시광선/근적외선 스펙트럼을 측정하였다. 그림 1과 같이 전체적으로 스펙트럼의 패턴은 유사하였으나 건조된 토양의 흡광도가 전체적으로 낮게 나타났으며, 특히 수분의 흡수 영역인 1300~1500nm, 1900~2200nm에서 흡광도 차이를 보이고 있다. 또한 표 2와 같이 각각의 스펙트럼을 이용하여 토양의 이화학적 성분을 예측 할 수 있는 PLS 모델을 개발한 결과, 전체적으로 건조한 토양을 이용한 예측모델

의 상관계수가 높게 나타났는데 이것은 건조한 토양이 체눈을 통하여 선별되어 토양입자가 고르며, 자연상태의 토양에 비하여 이물질 등의 영향이 적기 때문으로 판단된다. pH의 경우 자연상태 토양은 1900~2100nm영역에서 가장 좋은 상관관계를 보였으며, 검증결과 상관계수는 0.80, 검증부 오차는 0.12pH로 건조된 토양의 상관계수 0.93에 비하여 낮게 나타났다. 자연상태 토양에서의 질소 함량은 2000~2300nm에서 가장 높은 상관관계를 보였으며, 검증결과 상관계수는 0.89, 검증부 오차는 0.01%로 건조된 토양의 예측모델과 유사한 예측결과를 보이고 있어 모델이 질소 함량의 예측이 가능함을 보이고 있다. 인산의 함량은 자연상태 토양의 경우 2200~2400nm영역에서 모델검증 결과 상관계수는 0.72, 검증부 오차는 16.98mg/kg으로 건조된 토양의 경우와 유사하게 나타났으며, 자연상태 토양의 유기물 함량은 1800~2100nm의 영역에서 가장 좋은 상관관계를 보였으며, 검증결과 상관계수는 0.72, 검증부 오차는 1.43g/kg으로 건조된 토양의 예측결과에 비하여 다소 낮게 나타났다. Na, K의 함량은 자연상태 토양의 경우 1000~1900nm, 1100~1900nm 영역에서 상관계수는 각각 0.72, 0.83, 검증부 오차는 0.07cmol$^+$/kg, 0.13cmol$^+$/kg으로 건조된 토양의 예측결과와 다소 유사하게 나타났으며, Ca의 함량의 경우 1600~2200nm 영역에서 상관계수는 0.76, 검증부 오차는 0.17cmol$^+$/kg으로 자연상태 토양의 예측결과가 다소 낮게 나타났다. 마그네슘 함량은 건조된 토양은 1400~1600nm, 1800~2000nm 영역에서 검증결과 상관계수는 0.70, 검증부 오차는 0.02cmol$^+$/kg으로 나타났으며, 자연상태 토양의 경우 1400~1800nm 영역에서 검증결과 상관계수는 0.62, 검증부 오차는 0.01cmol$^+$/kg으로 두 가지 토양상태에서 모두 낮은 예측결과를 보이고 있다. 자연상태 토양의 수분 함량은 1800~2200nm에서 가장 높은 상관관계를 보이고 있으며, 검증결과 상관계수는 0.92, 검증부 오차는 2.16%로 모델이 수분 함량의 예측이 가능함을 보여주고 있다.

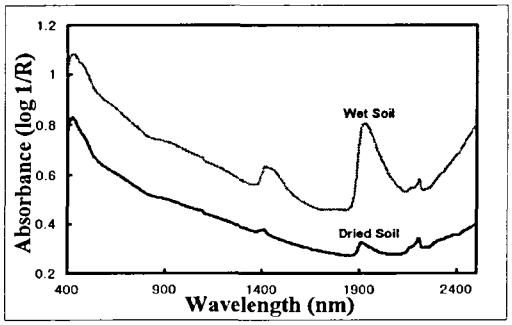

Fig. 1 Spectrum of dried soil and wet soil

4. 요약 및 결론

본 연구는 근적외선 분광법을 이용하여 포장에서 실시간 토양의 이화학적 성분 측정을 위한 기초연구로서 자연상태 토양과 건조된 토양의 광학적 특성을 구명하고 자연상태 토양과 건조된 상태 토양의 이화학적 성분을 예측할 수 있는 모델을 개발하여 각각의 성능을 비교 및 평가하기 위하여 수행되었다.

가시광선/근적외선 스펙트럼의 경우 자연상태 토양의 스펙트럼이 수분 함량에 의하여 건조된 토양에 비하여 전체적으로 흡광도가 높게 나타났으며, 부분최소자승법을 이용하여 토양 성분의 예측모델을 개발한 결과, 전체적으로 건조한 토양을 이용한 예측모델의 상관계수가 높게 나타났는데, 이것은 건조한 토양이 체눈을 통하여 선별되어 공극 및 이물질의 영향이 적기 때문으로 판단된다. 또한 자연상태 토양을 이용하여 예측모델을 개발한 결과 모두 근적외선 영역에서 높은 상관도를 보여 실제 포장의 토양을 건조시키거나 선별하지 않고 토양의 이화학적 성분 측정

이 가능함을 보여주고 있다. 그러나 마그네슘의 경우 자연상태 토양과 건조된 토양에서 모두 낮은 상관관계를 보여 모델이 마그네슘의 함량을 예측하기 어려운 것으로 판단되며, 현장적용을 위해서는 실험방법의 개선과 다양한 모델개발 알고리즘의 적용이 필요하다.

Table 2 PLS Reults for dried soil and wet soil of paddy field.

Property	Soil Condition	Wavelength	Calibration			Prediction	
			PC	R	SEC	R	SEP
pH	Dried Soil	1400-1600	3	0.92	0.08	0.93	0.09
	Wet Soil	1900-2100	4	0.87	0.11	0.80	0.12
T-N(%)	Dried Soil	2200-2400	5	0.97	0.01	0.91	0.01
	Wet Soil	2000-2300	4	0.88	0.01	0.89	0.01
P_2SO_4(mg/kg)	Dried Soil	1400-1700	4	0.80	13.36	0.77	14.29
	Wet Soil	2200-2400	6	0.83	12.58	0.72	16.98
Organic matter(g/kg)	Dried Soil	1900-2200	2	0.99	0.31	0.85	0.98
	Wet Soil	1800-2100	5	0.96	0.50	0.72	1.43
Ex.Na($cmol^+$/kg)	Dried Soil	2100-2300	5	0.88	0.04	0.76	0.06
	Wet Soil	1000-1900	10	0.88	0.03	0.72	0.07
Ex.Ca($cmol^+$/kg)	Dried Soil	1400-1600	3	0.97	0.11	0.83	0.30
	Wet Soil	1600-2200	13	0.80	0.14	0.76	0.17
Ex.K($cmol^+$/kg)	Dried Soil	1600-1900	8	0.85	0.10	0.84	0.10
	Wet Soil	1100-1900	3	0.84	0.09	0.83	0.13
Ex.Mg($cmol^+$/kg)	Dried Soil	1400-1600 1800-2000	2	0.88	0.01	0.70	0.02
	Wet Soil	1400-1800	2	0.59	0.01	0.62	0.01
Moisture Contents(%)	Wet Soil	1800-2200	8	0.96	1.49	0.92	2.16

Number of calibration : 30 Number of prediction : 30

5. 참고문헌

1. 조성인, 배영민, 양희성, 최상현. 2001. 근적외선 반사도를 이용한 토양 유기물 함량 측정. 한국농업기계학회지 26(5):475~480.
2. 농촌진흥청 농업과학기술원. 토양 및 식물체 분석법. 1997.
3. Gustav Fystro. 2002. The Prediction of C and N Content and Their Potential Mineralisation in Heterogeneous Soil Samples Using Vis - NIR Spectroscopy and Comparative Methods. Plant and Soil 246:139-149.
4. Kwan-Shig Ryu, Rae-Kwang Cho, Woo-Churl Park and Bok-Jin Kim. 2001. Use of NIR Soil Analyzer for Measuring Chemical Properties of Field Soil. Korean j. Soil Sci. & Fert 34(4):278~283.
5. Reeves, Ⅲ J. B. and Van Kessel, J. S. 2000. Dtermination of ammonium-N, moisture, total C and total N in dairy manures using a near infrared fibre-optic spectrometer. J. near infrared spectroscopy 8(3):151-160.