지구통계학을 이용한 습지 토양 중 총인의 공간분포 분석 Analysis of the Spatial Distribution of Total Phosphorus in Wetland Soils Using Geostatistics

김종성 · 이정우*[†]

Jongsung Kim · Jungwoo Lee*[†]

한국건설기술연구원 ICT 융합연구소 · *한국건설기술연구원 환경연구소

ICT Convergence and Integration Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received June 21, 2016; Revised October 4, 2016; Accepted October 19, 2016)

Abstract : Fusing satellite images and site-specific observations have potential to improve a predictive quality of environmental properties. However, the effect of the utilization of satellite images to predict soil properties in a wetland is still poorly understood. For the reason, block kriging and regression kriging were applied to a natural wetland, Water Conservation Area-2A in Florida, to compare the accuracy improvement of continuous models predicting total phosphorus in soils. Field observations were used to develop the soil total phosphorus prediction models. Additionally, the spectral data and derived indices from Landsat ETM+, which has 30 m spatial resolution, were used as independent variables for the regression kriging model. The block kriging model showed R^2 of 0.59 and the regression kriging model showed R^2 of 0.49. Although the block kriging performed better than the regression kriging, both models showed similar spatial patterns. Moreover, regression kriging utilizing a Landsat ETM+ image facilitated to capture unique and complex landscape features of the study area.

Key Words : Soil Prediction Model, Geostatistics, Satellite Image, Semivariogram, Block Kriging, Regression Kriging

요약 : 여러 환경요인을 예측하는데 위성영상과 측정데이터의 접목은 정확도를 향상시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 하지만 습지 토양에 포함되어있는 영양염류의 성분 등을 예측함에 있어 위성영상의 활용 효과는 잘 알려져 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 지구통계학 중 블록크리깅과 회귀크리깅을 자연습지인 에버글레이드에 위치한 수자원관리구역의 토양 내 총인 예측에 적용하였다. 토양시료의 측정된 총인농도를 이용하여 블록크리깅을, 측정값 외에 30 m의 공간해상도를 가지고 있는 위성영상인 Landsat ETM+로부터 추출한 스펙트럼 데이터 및 분광지수 등을 독립변인으로 하여 회귀크리깅을 실시한 결과, 블록크리깅의 결정계수는 0.59, 회귀크리깅의 결정계수는 0.49로 나타났다. 측정 자료만을 이용한 블록크리깅의 예측 오차가 위성영상을 이용한 회귀크리깅의 예측 오차보다 더 작았으나, 각각의 방법을 이용하여 총인 농도를 수자원관리구역에 매핑한 결과 두 경우 모두 비슷한 경향을 보였고, 회귀크리깅의 경우 연구대상구역의 독특하고 복잡한 경관요소들을 더욱 잘 표현할 수 있었다.

주제어 : 토양예측모델, 지구통계학, 위성영상, 세미베리오그램, 블록크리깅, 회귀크리깅

1. 서론

토양은 다른 환경요인들(e.g., 강수량, 온도 등)의 시간에 따른 변화에 따라 종속적으로 그 특성(e.g., 구성성분, 함량 등)이 변화하며 시공간적으로 그 변동성이 크다고 할 수 있다. 따라서 넓은 지역에 걸쳐서 토양의 시·공간적 변화나 특성, 환경변수들과 토양과의 관계 등을 이해하는 것은 복잡하고 어려운 일이다.¹⁾ 특히 토양의 공간적 변화는 특정 지역 안에서 환경요인들과 함께 계속적으로 변화하므로 그 변동성(variability)을 파악하기란 쉽지 않다. 또한 공간적인 변동성(spatial variability)을 파악하고자 모든 지점에서의 토양 관측은 불가능하며, 일반적으로 몇 몇 대표성을 가진 지점에서의 토양 시료 채취를 통해 전체 지역에서의 변화를 예상하고 있다. 대상지역의 토양 특성 변화를 전체적으로 이해하기 위하여 관측 자료를 이용한 다양한 토양모델

들(soil-landscape models)이 사용되고 있으며 특히 지구통계학(geostatistics)을 이용한 토양 특성 예측 모델들이 많이 사용되고 있다. 지구통계학이란 데이터 프로세싱에 있어서 관측 정보를 시·공간적으로 분석하는 통계학적인 접근방법으로²⁾ 토양 특성의 예측을 위해서는 1976년에 Webster and Butler에 의해 소개되었으며,³⁾ 토양 항목의 공간적 분포, 예측, 그리고 불확실성 분석 등에 주로 사용되고 있다. 또한 지구통계학은 관측 이외 지점에서의 예측치는 물론 예측오차를 제공하는 장점을 가지고 있어 토양 이외의 환경공학분야에서도 많이 사용되고 있다.

환경 특성을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 신뢰할 만한 관측 자료 및 이차적인 추가 자료들이 필요하며 1920년대 후반에는 항공사진, 1960년대에는 위성영상 및 Global Positioning System (GPS) 등의 사용으로 시간 및 비용을 절감하며 보다 정확한 예측이 가능해졌다. 특히 위성영상의

[†] Corresponding author E-mail: jungwoo33@kict.re.kr Tel: 031-995-0892 Fax: 031-910-0291

활용은 다양한 공간규모(spatial scale)의 지표를 관측할 수 있으며 자연적 또는 인위적인 프로세스를 통한 지표의 변화를 파악할 수 있게 하였다.⁴⁾ 위성영상 활용의 가장 큰 장점은 광범위한 지역에 걸친 정보의 획득 및 시료의 채취 등 접근이 제한된 지역의 정확한 정보를 획득할 수 있다는 것이다. 이러한 위성영상의 장점을 이용하여 다양한 지역에서 여러 공간규모에 걸친 많은 연구들이 수행되었다.⁵⁻¹⁰⁾ Mulder 등⁸⁾은 위성영상을 사용하여 토양 성분을 매핑(mapping)한 연구들을 총설로 발표한 바 있으며, 그들은 대부분의 연구가 위성영상을 사용하여 매핑한 경우가 위성데이터 없이 관측데이터만을 사용하여 매핑한 경우보다 정확도가 높아진다고 보고하였다. 그 중 대표적인 연구로 Peng 등⁵⁾이 Landsat Thematic Mapper와 IKONOS 영상데이터를 미국의 미네소타 지역에, Vrieling 등⁶⁾은 ASTER, QuickBird, 그리고 MODIS 영상데이터를 브라질의 사바나 지역에 토양 특성을 예측하기 위하여 적용한 것을 들 수 있다. 특히, 습지처럼 토양 시료의 채취가 어려운 경우에는 이러한 위성영상데이터의 사용이 시간, 경비, 그리고 노동력 등을 절감할 수 있는 대안이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 토양 특성 중 총인의 공간분포 예측에 있어서 위성영상 및 지형, 수문 등의 환경요인을 이용할 때 정확도가 얼마나 향상될 수 있는지 지구통계학적 방법을 이용하여 미국의 가장 큰 습지인 에버글레이드(Everglades)의 토양을 대상으로 연구하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구 대상 지역

The Greater Everglades는 미국 플로리다주의 최남단에 위치하고 있는 세계적인 규모의 자연 습지이다. The Everglades가 자리잡고 있는 플로리다는 약 1,346 mm의 연강우량을 가지며 이 중 약 70%가 여름 강우로 집중되어 있다. 이러한 강우의 계절적인 변동성과 높은 지하수층, 그리고 평평한 지형적인 조건으로 플로리다주에는 습지가 가장 일반적인 자연경관 중 하나이다. The Greater Everglades는 빈영양상태(Oligotrophic ecosystem)로 토양 및 물이 포함하고 있는 영양염류의 약 90%가 빗물을 통해 들어오는 생태시스템을 가지고 있었으나, 1930년대 가뭄 및 홍수의 통제를 위하여 매립 및 수로 공사를 하였고 그로인하여 The Everglades National Park와 수자원관리구역들(Water Conservation Areas, WCA)로 분리되었다. 북쪽에 위치한 매립 지역은 농업지역으로 광범위한 농업활동이 이루어졌으며, 이 농업지역을 통과한 물은 WCA로 흘러들어오게 하였다. WCA 중 본 연구는 2A 유역(Fig. 1)을 대상으로 수행되었으며 WCA-2A의 유역면적은 약 480 km²이다.

WCA-2A는 주로 유기질토양(Histosols in U.S. taxonomy)으로 구성되어 있으며 소그래스(sawgrass, *Cladium jamaicense* Crantz)와 수련(water lily, *Nymphaea odorata* Ait.)이 주 식

Fig. 1. Location of the Water Conservation Area-2A within the Everglades in Florida, U.S., and soil core sampling points.

생을 이루고 있다. 주로 솟아오른 지형(ridges)과 움푹 들어간 지형(sloughs)으로 구성되어 있으며 다양한 크기의 나무섬들(tree islands)을 볼 수 있다. 소그래스는 이 지역의 지배적인 식생으로 WCA-2A의 영양염류 농도가 낮은 지역에서 주로 볼 수 있으며, 수로 공사 후 북쪽의 농업지역에서 들어오는 영양염류 농도가 높은 물들로 인하여 일부 지역에서는 인이 비옥한 지역에서 자라는 대표식생인 부들(cattail, *Typha domingensis* Pers.)이 지배식생으로 대체되기도 하였다.¹¹⁾

2.2. 샘플 채취 및 분석

총 108개의 토양 시료를 계층화추출법(stratified random sampling design)을 통해 2009년 10월과 2010년 3월에 샘플링하였다. 에버글레이드의 경우, 지역의 특성상 하루에 4개 정도의 토양 시료를 채취할 수 있었으며, 번개와 같은 기상상황, 악어, 비단뱀 및 불가미 등의 자연환경, 그리고 새들의 번식기 등을 고려한 생태학적인 이유들로 접근할 수 있는 기간이 매우 한정적이었다. 10 cm 스테인리스 코어를 이용하여 표층으로부터 10 cm의 상층부 토양 시료를 채취하였으며, 채취된 시료는 그늘진 곳에서 풍건한 후, 돌맹이, 나뭇잎, 나무줄기 등 조대물질을 제거하였다. 이 후 0.45 μm 체로 체거름을 하였고 총인 농도를 구하기 위하여 표준실험법(the association of official analytical chemists, AOAC 978.01)에 따라 분석하였다.

2.3. 위성영상의 분광지수 추출 및 모델 독립변수 결정

총인의 공간분포를 예측하여 매핑하는데 위성영상자료의 사용이 정확도를 얼마나 향상시킬 수 있는지 보기 위하여 Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) 영상을 사용하였다. 시료의 채취 날짜, 운량(cloud cover), 영상잡음(noise) 등을 고려하여 영상을 선택하였다. 위성영상의 특성상 시료 채취 날짜와 정확하게 일치하는 영상을 구하기는 어려우며, 저자들은 시료의 채취 시기인 건기에 맞추어 영상의 취득 시기를 조정하여 Landsat ETM+ 영상은 2010년 2월의 영상(path:15/row:42)을 사용하였다. Landsat ETM+의 경우 2003년 5월부터 센서의 오작동(scan-line corrector failure)으로 일부 영상에 자료가 없는(no-data) 구역이 있으며 이로 인한 오차를 줄이기 위하여 해당지역에서의 토양 샘플은 제외하였다. Landsat ETM+영상은 30 m 공간해상도(spatial resolution)를 가진 blue, green, red, near-infrared (NIR), 2개의 mid-infrared (MIR) 밴드와 60 m 공간해상도를 가진 thermal infrared 밴드, 15 m의 공간해상도를 가진 panchromatic 밴드를 가지고 있다.

각 밴드별 데이터를 추출하여 모델의 독립변수로 사용하는 것 외에, ETM+ 영상을 이용하여 분광지수(spectral indices)를 추출하였다. 분광지수란 서로 다른 밴드 간의 조합을 통하여 영상노이즈 및 지형에 의한 영향을 감소시키고 동시에 특정 지표성분(예를 들어, 식생, 수분함량 등)의 반사특성을 증가시키는 효과가 있어 위성영상을 사용하는 많은 연구에서 사용되고 있다. 가장 대표적인 분광지수로는 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)로 식생지역과 그 활력도(vigor)를 보여주며, 본 연구에서는 NDVI, NDVIg (Normalized Difference Vegetation Green Index), Mid-infrared index, 그리고 TVI (Transformed Vegetation Index)를 사용하였다(Table 1). 또한 각 밴드를 주성분분석(Principal Component Analysis, PCA) 방법을 이용하여 총인 예측을 위한 추가적인 독립변수로 사용하였다. 영상자료

Table 1. Summary of remote sensing spectral indices

Indices*	Formula
Mid-infrared index	$\frac{MidIR_{Landsat\ Band5}}{MidIR_{Landsat\ Band7}}$
NDVI	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
NDVI green	$\frac{NIR - Green}{NIR + Green}$
TVI	$(\frac{NIR - Red}{NIR + Red} + 0.5)^{1/2} \times 100$

* Green, reflectance of 525-605 nm wavelength
MidIR, mid-infrared
NDVI, normalized difference vegetation index
NDVI green, normalized difference vegetation green index
NIR, near-infrared
Red, reflectance of 630-690 nm wavelength
TVI, transformed vegetation index

이외의 모델 독립변수로는 고도(elevation)와 수로의 수문으로부터의 거리(WCA-2A의 수문특성을 대표)를 사용하였다. 위성영상을 포함한 모델 독립변수는 ArcGIS10 (Environmental Systems Research Institute-ESRI Inc., Redlands, CA, USA)을 이용하여 추출하였다.

2.4. 모델구성-블록크리깅(Block Kriging)과 회귀크리깅(Regression Kriging)

크리깅은 통계학을 기반으로 관측 자료를 가지고 관측하지 않은 공간에 대한 값을 예측할 수 있게 하는 방법으로 지구통계학 중 가장 많이 사용되는 방법이다. 크리깅은 세미베리오그램(semivariogram)을 기본으로 하여 미관측 공간에 대한 값을 예측하며, 세미베리오그램은 관측 자료의 거리에 따른 상관관계 분석을 통해 공간변동성에 대한 정보를 제공한다. 세미베리오그램은 식 (1)과 같다.

$$r(h) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m \{s(x_i) - s(x_i + h)\}^2 \quad (1)$$

여기서, $r(h)$ 는 측정 항목의 평균 반분산(semivariance)이며, m 은 관측지점의 페어수(number of paris of sampling points), s 는 측정값, x 는 측정지점 i 의 좌표, 그리고 h 는 두 측정지점간의 거리(lag)이다. 세미베리오그램은 nugget-effect, range, sill로 관측 값의 공간의존성(spatial dependence)을 나타낸다. Nugget-effect란 생물학적 활동 등에 의해 기인한 아주 짧은 거리 내에서의 변동성으로 관측할 수 없는 임의의 변동성(random variation)을 나타낸다. 반분산은 보통 특정 상수 값에 접근할 때까지 거리가 증가함에 따라 꾸준히 증가하게 되는데 이 때 접근하는 상수 값을 sill, 그리고 상수 값에 도달할 때까지의 거리를 range라고 한다. 세미베리오그램 및 세미베리오그램을 기본으로 하는 크리깅에 관한 내용은 Webster³⁾와 Lee¹²⁾에 상세히 기술되어 있다.

본 연구에서는 측정값만을 이용한 단일변수방법(univariate interpolation method)과 그 외 다른 독립변수(위성영상, 고도, 수문 등)를 이용한 다변수방법(multivariate interpolation method)을 이용하여 독립변수, 특히 위성영상의 추가가 총인의 공간분포 및 예측에 어떠한 영향이 있는지 알아보고자 하였다. 단일변수방법으로는 관측된 총인의 세미베리오그램을 이용하여 일정 거리안(block size)에 위치한 공간내(block)의 총인 값을 예측하는 블록크리깅(block kriging)을 사용하였으며, 다변수방법으로는 회귀크리깅(regression kriging)을 이용하였다. 블록크리깅은 총인 예측을 위해 블록사이즈 10 m×10 m를 이용하였다. 회귀크리깅은 전형적인 통계학 방법인 회귀분석과 지구통계학을 접목한 방법¹³⁾으로 회귀분석을 통해 측정값들의 경향(trend)을 파악한 후 나머지 값들(residuals)을 크리깅을 이용하여 예측하는 방법이다. 본 연구에서는 먼저 위성영상데이터, 고도, 수문 등의 독립변수들을 이용하여 측정된 총인 값을 회귀분석을 한 후 실측값과 예측 값의 차이인 나머지 값들만을 크리깅하였고, 마

지막으로 회귀분석결과와 크리깅 결과를 더하여 예측, 매핑하여 회귀크리깅을 수행하였다. 측정된 총인의 분포가 정규분포를 따르지 않아 자연대수(natural logarithm)를 취하여 변환한 후 모델을 구성하였고, 총인의 공간분포 분석 및 예측 후에는 매핑을 위하여 다시 변환(back-transform)하였다. 모델의 오차평가를 위해서 결정계수(coefficient of determination, R^2)와 Root Mean Squared Error(RMSE)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 습지토양 중 총인의 분포

연구지역에서의 습지토양의 전용적밀도(bulk density)는 전 연구대상지역에 걸쳐서 고르게 분포되어 있었으며 평균 전용적밀도는 0.11 g/cm^3 로 습지토양 중 유기물의 함량이 매우 높은 것을 알 수 있다. 습지토양 중 총인 농도는 평균 601.4 mg/kg 이고, 측정값들은 정규분포를 따르지 않고 왜곡(Skewness)되어 있었다(Table 2). 측정된 습지토양 중 총인 농도의 범위는 $1,529 \text{ mg/kg}$ 으로 변동성이 큰 것을 알 수 있다. 대체적으로 높은 총인 농도는 농업용수가 주로 유입되는 수로의 수문가까이에서 관찰되었으며 습지 내부에서는 주로 낮은 총인 농도가 관찰되었다.

3.2. 공간예측모델: 블록크리깅

측정된 총인의 분포가 Table 2에 나타난 것처럼 왜곡 정도가 심하고 정규분포를 따르지 않아 자연대수를 취하여 변환한 후 블록크리깅을 하기 위한 세미베리오그램을 분석

Table 2. Descriptive statistics for soil total phosphorus (n = 108)

Property	Unit	Mean	Min.	Max.	Median	Std. deviation	Skewness
Bulk density	g/cm^3	0.11	0.05	0.24	0.10	0.04	1.30
TP concentration	mg/kg	601.4	165.4	1,694	478.8	336.7	1.25

Fig. 2. Kriging variogram fit for lnTP (a) and cross-validation results (b).

하였다(Fig. 2). Fig 2(a)에서 보는 것처럼 자연대수를 취하여 변환된 토양 내 총인 농도는 가우시안(Gaussian) 프로세스를 가지며 nugget이 0.129 (mg/kg)^2 , sill이 0.325 (mg/kg)^2 , range가 약 9,064 m를 가졌다. 이는 습지토양 내 총인의 높은 공간의존도로 해석될 수 있다. 달리 말하면 거리가 약 9,000 m까지 떨어져있는 두 지점의 습지토양 내 총인의 농도가 비슷하다는 것을 뜻하며, 이는 DeBusk 등¹⁴⁾이 같은 지역을 대상으로 연구한 9,300 m와 유사한 결과를 보였다. 하지만, 많은 연구들^{15~19)} 이 토양 내 영양염류농도의 공간 의존도를 1,000 m 이하로 보고한 것과는 상반된 결과이다. 하지만 토양 내 영양염류농도의 공간변동성 및 의존도를 보고한 연구의 대부분은 습지토양이 아닌 상대적으로 건조한 내륙(inland areas)의 토양을 대상으로 한 것으로 직접적인 비교는 어렵다고 할 수 있다. WCA-2A는 나무섬과 일부 솟아오른 지형(ridge)의 토양을 제외한 대부분이 연중 물에 잠겨 있으며 이로 인해 유기물의 분해가 느리게 이루어지고 있다. 또한 연구지역 전체에 걸쳐 토양을 이루는 주된 식생이 소그래스와 수련으로 종류가 복잡하지 않아 토양을 이루는 식생이 다양한 내륙지역에 비하여 토양의 구성성분이 균등함을 유지하고 있다고 판단된다. 세미베리오그램 range가 나타내는 또 하나의 결론은 본 연구에서 사용한 10 m의 블록사이즈는 range에 비하여 짧은 거리로 습지토양 내 총인 농도를 예측하는데 큰 영향을 주지 않는다는 것이다.

블록크리깅을 실시한 후 모델의 신뢰성 및 정확도를 위하여 교차검증(cross-validation)하였다. 여러 가지 교차검증 방법 중 본 연구에서는 Leave-one-out 교차검증방법을 이용하였다. 이 방법은 한 지점의 측정값을 제외하고 나머지 지점의 측정값들로 모델을 구성한 후, 제외되었던 지점을 구성된 모델로 예측하고 그 예측값과 실제 측정값의 차이를 비교하는 작업을 전체 관측 지점에 걸쳐 비교하는 방법이다. 이에 대한 결과는 Fig. 2(b)와 같다. 교차검증 결과 블록크리깅의 결정계수는 0.59를 보였으며, 이러한 결과는 Fig. 2(b)의 실선(결정계수 = 1)으로부터 다소 분산되어있는 형태로 확인할 수 있다.

3.3. 공간예측모델: 회귀크리깅

블록크리깅과 마찬가지로 회귀크리깅을 수행하기 위하여 자연대수를 취하여 변환한 총인 농도를 사용하였다. 먼저 회귀분석을 위하여 변수들 간의 상호연관성(correlation)을 분석하였다. 그 결과 총인 농도는 수문에서의 거리, NIR 밴드데이터, NDVIg, 그리고 PCA1과 유의한 상관관계를 보였다(Fig. 3). 이러한 상관관계는 변수들이 포함하고 있는 정보로 설명이 가능하다. 먼저 수문에서의 거리는 가까울수록 높은 농도의 총인이 포함되어 있는 농업용수가 유입되며, 총인의 특성상 토양으로 침강되는 부분이 많아 토양 중 총인의 농도가 높을 것이고, 거리가 멀어질수록 토양 내 총인의 농도가 낮아질 것이다. NIR 밴드는 주로 식물의 상태정보를 포함²⁰⁾하기 때문에 인이 비옥한 지역에서 높은 밀도로 자라는 부들(cattail)의 정보를 많이 포함하며, 토양 내 총인의 농도와 상관관계가 나타난 것으로 설명할 수 있다. 본 연구지역의 Landsat ETM+ 이미지를 주성분분석한 결과, PCA1의 경우 식생과 물을 구분할 수 있는 정보가 포함되어 있어 습지토양 중 총인 농도와 상관관계를 설명할 수 있다. 토양 내 총인 농도와 상관관계가 가장 강하게 나타난 NDVIg의 경우 다른 분광지수와는 달리 green 밴드를 포함한다. Green 밴드의 경우 클로로필 농도에 민감하고²¹⁾ 약 1 m 이내의 얇은 물을 투과할 수 있으며 따라서 수면 아래에 있는 습지토양의 정보를 보다 잘 나타낼 수 있었다고 판단된다. 상관관계 분석을 통해 유의한(p-value < 0.05) 독립변수만을 사용하여 회귀분석을 통한 경향분석을 수행하였으며 회귀분석 결과는 식 (2)와 같다.

$$\ln TP = 6.19 - 0.00003 \times \text{Dist.WCS} + 0.012 \times \text{NIR} + 3.49 \times \text{NDVIg} - 0.007 \times \text{PCA1} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 구한 총인 농도와 실제로 측정한 총인 농도의 차이인 나머지값을 크리깅하기 위하여 세미베리오그램 분석하였고, 회귀분석을 통해 구한 경향과 크리깅을 통해 구한 나머지값을 더하여 매핑하였다.

3.4. 공간예측모델: 총인농도의 공간분포 및 매핑

크리깅 및 회귀분석을 위해 자연대수를 취하여 변환한 총인 농도는 back-transform하여 매핑하였다. 10 m × 10 m 사이즈로 블록크리깅한 총인 농도의 분포는 Fig. 4(a)와 같으며 결정계수는 0.59, RMSE는 216.2를 보였다. Fig. 4(b)는 회귀크리깅을 이용하여 매핑한 것으로 결정계수는 0.49, RMSE는 257.9를 보였다. 오차평가를 위하여 사용한 결정계수와 RMSE만을 비교하면 다변수방법으로 선택한 회귀크리깅보다 단일변수방법으로 선택한 블록크리깅이 더 작은 오차, 즉 보다 좋은 예측결과를 보였다. 이는 기존에 발표된 대부분의 연구와 상반된 결과로 기존의 연구는 단일변수방법보다 다변수방법을 사용하였을 때 향상된 예측결과를 보였다. 다변수방법의 사용으로 향상된 예측결과를 보인 연구는 Mulder 등⁸⁾에 상세하게 보고되어 있다. 다변수방법을 사용하였을 때 향상된 예측결과를 보이는 이유는 토양의 조성 성분에 여러 환경요인들, 특히 고도, 경사면, 경사도, 수문 환경 등의 영향이 크기 때문이다. 이러한 환경요인들은 토양성분의 측정 자료만으로 설명하는데 한계를 가지며, 환경요인들을 설명할 수 있는 부가적인 독립변수들이 포함되었을 때 향상된 예측결과를 보일 수 있는 것이다. 하지만 본 연구의 대상지역인 WCA-2A의 경우, 전 지역에 걸친 고도의 변화가 거의 없는 평탄한 지역이며, 유일한 지형의 변화를 보이는 솟아오른 지형(ridge)과 움푹 들어간 지형(sloughs)의 경우도 일정 깊이의 수면 아래에서 나타나는 지형변화로 위성영상데이터로 표현하는데 한계를 가진다. 수문환경의 경

Fig. 3. Correlation test for Regression Kriging (trend analysis): Dist.WCS=distance to water control structures; ETM NIR=near-infrared band of Landsat ETM+ image; ETM NDVIg=normalized difference vegetation green index derived from Landsat ETM+; ETM PCA1=principal components analysis score 1 using Landsat ETM+ image.

Fig. 4. Prediction maps of soil total phosphorus concentrations (mg/kg) using Block Kriging (a) and Regression Kriging with Landsat ETM+ image derived spectral input variables and environmental predictor variables (b).

우, WCA-2A 전체의 유량이 수로에 위치한 수문을 통해서 결정되며 그 양이 연중 거의 일정하여 아주 느린 흐름만이 발생하기 때문에 연구대상지 전체에 걸쳐 단조로운(homogeneous) 수문환경을 가지고 있어 독립변인으로 사용되었을 때 예측하는 힘이 크지 않았을 것이라 판단된다.

블록크리깅과 회귀크리깅을 이용하여 매핑한 총인은 농업용수가 유입되는 지점을 중심으로 가장 높은 농도를 보였으며, 유입지점부터 거리가 멀어질수록 점차 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 습지 내부의 경우 농업용수에 포함되어 어있는 총인의 영향을 적게 받아 낮은 농도를 보였다. 전체적으로 블록크리깅과 회귀크리깅은 비슷한 총인 농도의 공간 변동성을 보였으며 다만, 위성영상 및 다른 환경요인을 독립변수로 사용한 회귀크리깅의 경우 습지 내에 위치한 나무섬과 같은 연구대상지역의 특성이 보다 자세히 표현되었다.

4. 결론

본 연구는 WCA-2A 습지토양 내 총인농도의 공간분포를 지구통계학을 이용하여 분석, 예측, 매핑하였다. 특히, 습지의 경우 토양 시료의 채취는 내륙의 토양 시료 채취에 비하여 시간, 경비, 노동력 등이 더 필요하다고 할 수 있으며 이러한 어려움을 대체하기 위한 수단으로 위성영상의 활용성을 연구하였다. 관측 자료만을 이용하여 공간분포를 예측하는 블록크리깅과 관측 자료 이외의 부가적인 환경정보로 위성영상, 고도, 수문환경을 독립변수로 추가한 회귀크리깅 방법을 이용하였으며, 블록크리깅과 회귀크리깅을 이용한 습지토양 내 총인 농도 예측결과 결정계수가 각각 0.59와 0.49로 단일변수를 사용한 블록크리깅이 회귀크리깅에 비하여 향상된 예측결과를 보였다. 이러한 결과는 연구대상지역인 WCA-2A가 전 지역에 걸쳐서 고도의 변화가 거의 없고, 수문환경이 동일하며, 흐름이 거의 없는 지역 특성에서

비롯된 것으로 판단된다.

두 가지 모델을 이용하여 총인 농도 예측을 매핑한 결과는 블록크리깅과 회귀크리깅 모두 수로 부근에서의 높은 농도와 습지 내부의 낮은 농도로 비슷한 경향을 보였지만 블록크리깅은 전 지역에 걸쳐 매끄러운 변화(smoothed-out)를, 회귀크리깅은 습지 내에 위치한 경관특성(landscape features) 등 보다 자세한 지역 특성을 보이는 차이가 있었다. 본 연구는 위성영상데이터 및 환경요인 등의 부가적인 데이터의 추가가 반드시 향상된 예측결과를 보장하는 것은 아니라는 점과 연구대상지역의 특성을 잘 반영할 수 있는 환경요소의 파악이 보다 중요하다는 점을 시사한다.

KSEE

References

1. Grunwald, S., "What Do We Really Know about the Space-Time Continuum of Soil-Landscapes?," pp. 3-36. In: Grunwald, S., ed. Environmental Soil-Landscape Modeling: Geographic Information Technologies and Pedometrics. CRC Press, New York(2006).
2. Goovaerts, P., Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford University Press, New York(1997).
3. Webster, R. and Oliver, M. A., Geostatistics for Environmental Scientist (Second ed.), John Wiley & Sons Ltd. England (2007).
4. Schmid, T., Koch, M., DiBlasi, M. and Hagos, M., "Spatial and Spectral Analysis of Soil Surface Properties for an Archaeological area in Aksum, Ethiopia, Applying high and medium Resolution Data," *Catena*, **75**(1), 93~101(2008).
5. Peng, W., Wheeler, D. B., Bell, J. E. and Krusemark, M. G., "Delineating Patterns of Soil Drainage Class on Bare Soils Using Remote Sensing Analyses," *Geoderma*, **115**, 261~279 (2003).
6. Vrieling, A., de Jong, S. M., Sterk, G. and Rodrigues, S. C.,

- “Timing of Erosion and Satellite Data: A Multi-resolution Approach to Soil Erosion Risk Mapping,” *Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinformation*, **10**, 267~281(2008).
7. Selige, T., Böhner, J. and Schmidhalter, U., “High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures,” *Geoderma*, **136**, 235~244(2006).
8. Mulder, V. L., de Bruin, S., Schaepman, M. E. and Mayr, T. R., “The use of remote sensing in soil and terrain mapping - A review,” *Geoderma*, **162**, 1~19(2011).
9. Eldeiry, A. A. and Garcia, L. A., “Detecting soil salinity in Alfalfa fields using spatial modeling and remote sensing,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **72**, 201~211(2008).
10. F-Buces, N., Siebe, C., Cram, S. and Palacio, J. L., “Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: a case study in the former lake Texcoco, Mexico,” *J. Arid Environ.*, **65**, 644~667(2006).
11. Noe, G. B., Childers, D. L. and Jones, R. D., “Phosphorus biogeochemistry and the impact of phosphorus enrichment: Why is the Everglades so unique?,” *Ecosystems*, **4**, 603~624 (2001).
12. Lee, S.-I., “Geostatistical estimation of subsurface contaminant concentration-I. Model development,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **24**(2), 295~302(2002).
13. Stacey, K. F., Lark, R. M., Whitmore, A. P. and Milne, A. E., “Using a process model and regression kriging to improve predictions of nitrous oxide emissions from soil,” *Geoderma*, **135**, 107~117(2006).
14. DeBusk, W. F., Newman, S., Reddy, K. R., “Spatio-temporal patterns of soil phosphorus enrichment in Everglades Water Conservation Area 2A,” *J. Environ. Qual.*, **30**(4), 1438~1446 (2001).
15. Santra, P., Chopra, U. K. and Chakraborty, D., “Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in an agricultural farm,” *Curr. Sci.*, **95**(7), 937~945(2008).
16. Rossi, J., Govaerts, A., De Vos, B., Verhist, B., Vervoort, A., Poesen, J., Muys, B. and Deckers, J., “Spatial Structures of soil organic carbon in tropical forests - A case study of Southeasten Tanzania,” *Catena*, **77**(1), 19~27(2009).
17. Mzuku, M., Khosla, R., Reich, R., Inman, D., Smith, F. and MacDonald, L., “Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **69**, 1572~1579(2005).
18. Balasumdrum, S. K., Husni, M. H. A. and Ahmed, O. H., “Application of Geostatistical Tools to Quantify Spatial Variability of Selected Soil Chemical Properties from a Cultivated Tropical Peat,” *J. Agronomy*, **7**(1), 82~87(2008).
19. Terra, J. A., Shaw, J. N., Reeves, D. W., Raper, R. L., Santen, E. and Mask, P. L., “Soil Carbon Relationships with Terrain attributes, Electrical conductivity, and a Soil survey in a Coastal Plain Landscape,” *Soil Sci.*, **169**(12), 819~831 (2004).
20. Chen, J. M., Pavlic, G., Brown, L., Cihlar, J., Leblanc, S. G., White, H. P., Hall, R. J., Peddle, D. R., King, D. J., Trofymow, J. A., Swift, E., Van der Sanden, J. and Pellikka, P. K. E., “Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements,” *Remote Sensing of Environ.*, **80**, 165~184(2002).
21. Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J. and Merzlyak, M. N., “Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS,” *Remote Sensing of Environ.*, **58**, 289~298(1996).