

Differences in Spatial Variation of Soil Chemistry Between Natural and Anthropogenic Soils

Yeon-Kyu Sonn, Seung-Oh Hur, Byung-Geun Hyun, Hyun-Joon Cho, and Kook-Sik Shin*

National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju 565-851, Republic of Korea

(Received: November 9 2014, Revised: November 25 2014, Accepted: November 26 2014)

The Agricultural Land Remodeling Project was launched for agricultural fields with potential risk of flooding which were placed in low-lying area as a part of agricultural sectors of the National 4 River Project. It induced of the reclaimed agricultural fields on a national scale. The arable lands reestablished by reclamation have caused several big problems such as destruction of soil physicochemical properties, and thus the techniques to solve disadvantages were urgently required. In this study, we collected experimental samples from top soils in three agricultural areas, one from conventional agricultural fields (Hwasun, Jeollanam-do) and the others from reclaimed (remodelled) agricultural fields (Naju, Jeollanam-do and Gumi, Gyeongsangbuk-do). The soil chemistry data were analyzed using statistic tools such as semi-variance and kriging, and differences between natural and reconstructed soils were examined. The score, R (A₀) which indicates a dependence distance between each chemical element, was as follows; 21.8~43.5 (Conventional, Hwasun), 4.4~70.6 (Remodelled, Naju) and 5.3~43.6 (Remodelled, Gumi). These results suggested that chemical properties of the reclaimed agricultural fields had a huge variation. Moreover, the result of kriging maps also represented a ununiform pattern in the reclaimed lands. As a result of this study, it is strongly required to build up the soil type-specific management techniques for the reclaimed agricultural lands.

Key words: Land remodeling, Anthropogenic soils, Range, Sill, Nugget, Kriging map

The variogram model and ranges of soil chemical properties.

| Soils | Items | Nugget (C ₀) | Sill (C ₀ +C) | Range (A ₀) | R ² | Model |
|--------------------------|---|--------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------|-------------|
| Hwasun (Natural Soil) | pH | 0.093 | 0.365 | 34.9 | 0.998 | Gaussian |
| | EC | 0.185 | 1.013 | 43.5 | 0.997 | Gaussian |
| | OM | 0.340 | 4.308 | 21.8 | 1.000 | Gaussian |
| | Available P ₂ O ₅ | 1170 | 6,450 | 34.2 | 0.994 | Gaussian |
| | Exchangeable Ca | 0.078 | 0.243 | 35.0 | 0.995 | Gaussian |
| | Exchangeable Mg | 1.550 | 6.446 | 32.4 | 1.000 | Gaussian |
| | Exchangeable K | 0.000 | 0.002 | 31.7 | 1.000 | Spherical |
| Naju (Remodeled Soil) | pH | 0.000 | 0.040 | 4.4 | 0.117 | Exponential |
| | EC | 0.054 | 0.054 | 42.1 | 0.631 | Linear |
| | OM | 0.050 | 1.038 | 22.1 | 0.910 | Spherical |
| | Available P ₂ O ₅ | 421 | 3,545 | 5.1 | 0.090 | Exponential |
| | Exchangeable Ca | 0.008 | 0.230 | 20.0 | 0.689 | Spherical |
| | Exchangeable Mg | 0.014 | 0.106 | 70.6 | 0.990 | Gaussian |
| | Exchangeable K | 0.000 | 0.015 | 11.4 | 0.890 | Exponential |
| Gumi (Remodeled Soil) | pH | 0.019 | 0.167 | 9.4 | 0.892 | Exponential |
| | EC | 0.010 | 0.010 | 53.0 | 0.195 | Linear |
| | OM | 0.003 | 0.629 | 5.3 | 0.359 | Exponential |
| | Available P ₂ O ₅ | 3,000 | 47,100 | 46.3 | 0.982 | Gaussian |
| | Exchangeable Ca | 0.000 | 0.188 | 7.7 | 0.665 | Exponential |
| | Exchangeable Mg | 0.001 | 0.001 | 6.2 | 0.059 | Gaussian |
| | Exchangeable K | 0.000 | 0.006 | 10.3 | 0.927 | Exponential |

*Corresponding author : Phone: +82632382427, Fax: +82632383822, E-mail: sks999@korea.kr

§Acknowledgement: This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ008620)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

국내에서는 2008년 하반기부터 4대강유역의 노후제방을 보강하고 하천생태계 복원 및 홍수조절 등을 위한 4대강 사업으로 인하여 강유역의 일부 저지대에 속하는 농경지를 대상으로 리모델링 사업이 추진되어 규모가 큰 매립적토형 농경지가 조성되게 되었다. 지금까지 조사된 국내의 대표적 인위토양은 4대강 주변을 중심으로 한 매립적토형 인위토양 농경지가 7,724 ha에 달하며, 그 외에 성주, 평창 등의 대규모 채소류 재배 단지가 약 4,000 ha를 차지하고 있고, 그 분포면적은 해마다 늘어가고 있는 실정이다. 이러한 매립적토형 인위토양은 그 지역에서 토양 구조를 단시간 내에 악화시킴으로써 환경과의 불균형으로 여러 문제점이 예상되며, 이에 대한 연구 결과도 부족한 실정이다. 일례로 심층 퇴적 함황토의 노출과 산화에 따른 산성화, 철분과다용출, 토성 급변층의 형성에 따른 수분이동 저해와 경반생성 문제 등 해결해야 할 기술적 문제들이 발생되고 있다 (Sonn et al., 2012).

토양은 공간적으로 변이를 갖고 있으며 토양분류학적 측면에서 보았을 때 동일포장 내에서도 위치별로 토양의 이화학적특성, 작물수량, 생육 등이 다른 결과를 초래하게 된다 고 선행 연구자들이 보고해 왔다 (Park, 1987). 따라서 이런 공간변이는 일반적인 시료분석으로 파악하기가 불가능하여, 통계적 접근법을 사용하여 해석하는 방법이 가능할 수 있다 (Park and Yoo, 1989). 이런 통계방법중 하나로 공간변이 (kriging) 분석을 들 수 있는데, 이는 지질, 해양, 대기 등 지구과학분야에서 공간자료의 구조적인 분석을 위해서 주로 이용되어 왔으며, 특히 공간상에 분포하는 확률변수 (random variables)들을 이용하여 자료가 없는 필요한 지점에서 값을 추정해 내는 통계학적 기법이다. 공간변이에 대한 연구는 최근 많이 이루어지고 있으나 대부분 분포지도를 보여주는 형태에 그치고 있으며, 분석 후 자료의 해석을 명확하게 하지 못하고 있는 실정이다 (Park et al., 2006; Sohn et al., 2009). 국내에서 농업분야에서의 지구통계학은 주로 정밀 농업을 연구하는 학자들을 중심으로 이용되어 왔다 (Chung et al., 2000). Lee et al. (2002)은 논토양의 표토화학성 및 수량을 조사하여 공간통계의존성 분석을 보고한 바 있으며, Park and Yoo (1989)는 화동통에서 가비중, 포장용수량, 포화수리전도도 등의 공간분포를 통한 차이점을 연구한 바 있었고, Park et al. (1984)은 토양중 물 침수속도에 따른 공간 변이성 분석을 실시하는 등 여러 연구가 진행되어 왔다. 그러나 현재까지 지구통계학을 농업적으로 이용한 연구는 아직 부족한 실정이라 판단되어 본 연구에서는 매립적토형 인위토양인 농경지 2개지구 (나주, 구미)와 일반 농경지 토양인 논토양 1개지역 (화순)를 선정하여 10 m 간격으로 시료를 채취하여 각각 표토의 화학성 변이 분석을 실시하여 리

모델링 농경지와 일반농경지 간의 차이를 살펴보았으며, 각 성분들 간의 상호 관련성을 비교하여 여러 가지 정보를 해석하는 기법에 기초한 반분산분석 (semivariance analysis) 및 kriging에 의한 결과의 해석을 목적으로 두었다.

Materials and methods

본 시험에서는 토양의 특성을 분석하기 위하여 단면조사 (100 cm)를 실시하였으며, 표토화학성 분석을 위한 표토 시료를 10 × 10 m 간격으로 전남 나주시에 위치한 매립적토형 인위토양 농경지 (100 × 60 m) 시료 60점, 경북 구미에 위치한 매립적토형 인위토양 농경지 (100 × 100 m) 시료 100점 및 전남 화순에 위치한 일반 농경지 토양인 극락동 (80 × 40 m) 시료를 표토에서 32점을 채취하였다. 화학성 분석은 농촌진흥청 토양 및 식물체분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 표토의 화학성분 중 pH, EC, 유기물, 유효인산 및 치환성 양이온 (Ca, Mg, K)의 분석을 시행하였다. 이렇게 얻어진 각 특성별 정보의 해석을 위해 GS+ 프로그램 (Robertson, 1998)을 이용하여 variogram과 kriging을 수행하여 비교하였다.

반베리오그램 모델링 (Semivariogram modeling) semi-variance 분석은 일정거리만큼 떨어져 있는 자료들이 평균적으로 얼마나 다른지를 나타내는 정량적 지표라 정의할 수 있다. 공간분석을 수행할 때의 기본적인 가정은 공간상의 두 지점간의 거리가 가까울수록 상호간에 큰 영향을 미치고 두 지점 간의 거리가 멀수록 영향력이 떨어진다는 것이며 (Lee, 2001; Lee et al., 2002), 그 기본적인 식은 다음과 같다 (Eq. (1)).

$$\gamma(h) = \left[\frac{1}{2} N(h) \right] \sum [z_i - z_{i+h}]^2 \quad (1)$$

$\gamma(h)$ = semivariance for interval distance class h

z_i = measured sample value at point i

z_{i+h} = measured sample value at point $i+h$; and

$N(h)$ = total number of sample couples for the lag interval h

Variogram의 주요 인자로는 Fig. 1과 같이 sill, partial sill, 상관거리 (separation distance), nugget, range 등이 있으며, 반분산이 일정한 값을 가질 때의 거리를 range라고 하고 이때 y 값을 sill이라고 하며, 이때의 sill값은 자료의 분산을 의미한다 (Jung et al., 2010). 반분산 모델은 sill값의 존재 유무에 따라 여러 가지 모델로 구분되는데 일반적으로 사용되는 variogram model에는 linear, spherical, exponential,

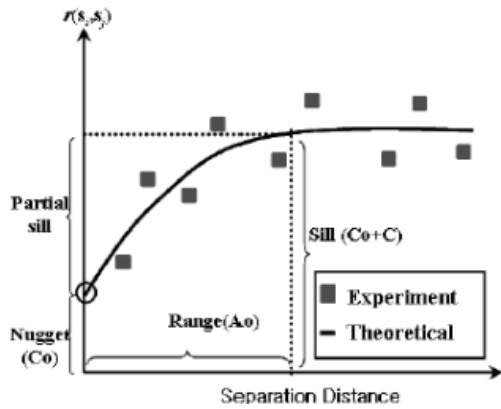


Fig. 1. Semivariogram schematic (Journel and Huijbregts, 1978).

gaussian 등이 있으며, 이중 자료의 공간적 상호관계를 가장 잘 묘사하는 모델을 선택해야 한다 (Journel and Huijbregts, 1978). 또한, semivariance가 거리에 따라 증가하는 경우에는 일반적 공분산 (generalized covariance)을 이용하는 범용 크리깅 (universal kriging)이 보통 크리깅에 비해 보다 정밀한 추정치들을 주는 것으로 알려져 있으나, 거리 증가에 따라 semivariance가 감소하는 경우에는 보통 크리깅을 이용하게 된다 (Chung, 1993).

Results and Discussion

공간변이성 해석 전라남도 화순군 도곡면에 위치한 논 포장은 곡간지 토양과 하성평탄지의 인접된 토양으로 지형적으로 하성평탄지 (홍적토양)이며, 0~2%의 경사를 가지고 있으며 토양명은 극락통 (fine, mixed, mesic family of Anthraquic Hapludalfs)으로 분류된 토양이다. 전라남도 나주시 이창동에 위치한 논 포장은 인창통 (fine, mixed, mesic family of Typic Udorthents)으로 표토를 약 60 cm 걷어낸 후 약 2 m의 준설토를 적토한 뒤 원토양을 다시 위에 적토한 상태의 토양으로 상층부의 원토양은 토양구조가 다 파괴되었으며, 물리성 및 화학성이 교란된 상태였다. 구미시 도개면 가산리에 위치한 논 포장은 인기통 (coarse loamy over sandy skeletal, mixed, mesic family of Typic Udorthents)으로 표토를 약 60 cm 걷어낸 뒤 약 3 m의 강바닥 준설토를 적토한 후 원토양을 다시 위에 적토한 상태의 토양이었다. 이 3개 지점의 표토화학성에 대한 기술통계 값은 Table 1과 같았으며, 그중 pH는 구미지역이 평균 6.5로 화순 (5.8), 나주 (5.7) 지역에 비해 높은 pH를 나타내었다. 유기물 함량은 일반 농경지인 화순지역에서 21.3 g kg⁻¹으로 높았고, 매립 적토형 인위토양인 나주와 구미지역에서는 각각 7.5, 5.0 g

Table 1. Descriptive statistics of soil chemical properties.

| Soils | Item | Mean | Std. Dev. | S.V. [†] | Min Value | Max Value | Skew. [‡] | Kurt. [§] |
|--------------------------|--------------------------------------|--------|-----------|-------------------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|
| Hwasun (Natural soil) | pH | 5.80 | 0.47 | 0.22 | 5.41 | 7.57 | 1.98 | 4.20 |
| | EC | 0.78 | 0.72 | 0.51 | 0.32 | 4.21 | 3.68 | 14.63 |
| | OM | 21.34 | 1.75 | 3.07 | 18.42 | 25.62 | 0.77 | -0.09 |
| | Avail. P ₂ O ₅ | 175.89 | 61.78 | 3,816 | 107.15 | 365.44 | 1.09 | 0.84 |
| | Exch. Ca | 3.82 | 0.42 | 0.18 | 2.55 | 5.31 | 0.51 | 5.25 |
| | Exch. Mg | 1.39 | 2.08 | 4.33 | 0.14 | 10.57 | 2.95 | 10.00 |
| | Exch. K | 0.38 | 0.04 | 0.00 | 0.25 | 0.46 | -0.79 | 1.14 |
| Naju (Remodeled soil) | pH | 5.71 | 0.21 | 0.04 | 5.30 | 6.28 | 0.60 | 0.25 |
| | EC | 0.57 | 0.23 | 0.05 | 0.25 | 1.43 | 1.37 | 2.57 |
| | OM | 7.52 | 1.06 | 1.12 | 6.08 | 9.60 | 0.32 | -1.12 |
| | Avail. P ₂ O ₅ | 188.27 | 57.68 | 3,327 | 102.39 | 430.79 | 2.05 | 5.62 |
| | Exch. Ca | 4.70 | 0.54 | 0.30 | 3.45 | 6.21 | 0.34 | 0.52 |
| | Exch. Mg | 0.60 | 0.17 | 0.03 | 0.29 | 1.13 | 0.80 | 0.68 |
| | Exch. K | 1.10 | 0.13 | 0.02 | 0.82 | 1.42 | -0.16 | 0.11 |
| Gumi (Remodeled soil) | pH | 6.50 | 0.40 | 0.16 | 5.68 | 7.44 | 0.19 | -0.75 |
| | EC | 0.33 | 0.10 | 0.01 | 0.16 | 0.64 | 1.17 | 1.21 |
| | OM | 5.01 | 0.82 | 0.67 | 3.00 | 7.06 | -0.11 | -0.13 |
| | Avail. P ₂ O ₅ | 478.50 | 188.49 | 35,527 | 198.96 | 869.67 | 0.10 | -1.29 |
| | Exch. Ca | 3.88 | 0.46 | 0.21 | 2.78 | 5.32 | 0.28 | 0.35 |
| | Exch. Mg | 0.16 | 0.07 | 0.01 | 0.01 | 0.41 | 0.78 | 1.75 |
| | Exch. K | 0.47 | 0.08 | 0.01 | 0.31 | 0.66 | 0.07 | -0.36 |

[†]Sample variance, [‡]Skewness, [§]Kurtosis.

kg⁻¹으로 상대적으로 낮은 값을 보여, 유기물의 적절한 사용이 요구되는 특징을 보였다. 한편 유효인산 함량을 보면 유기물과는 대조적으로 일반 농경지인 화순지역의 평균값이 175.9 mg kg⁻¹으로 매립적토형 인위토양인 나주, 구미 지역의 188.3, 478.5 mg kg⁻¹에 비하여 상대적으로 낮은 값을 보였다. 특히, 유효인산의 편차가 커서 표본분산 (sample variance) 값이 구미 (35,527) > 화순 (3,816) > 나주 (3,327) 순으로 큰 값을 보였다. 그 외에 양이온들은 일반 농경지 토양과 매립적토형 인위토양에서 큰 편차를 보이지 않았다. 한

편, 왜도 (skewness)와 첨도 (kurtosis)는 각각 기울어진 정도와 뾰족한 정도를 나타내는 값으로서 첨도의 값이 1이고, 왜도가 0이면 표준정규분포 형태가 되며, 첨도가 값이 크면 평균에서 상당히 높은 형태가 된다고 알려져 있으며, 왜도가 0보다 크면 오른쪽으로 기울어진 것이고, 0보다 작으면 왼쪽으로 기울어진 것을 의미 한다 (Jung et al., 2010). 따라서 본 기술통계 값의 전체적인 정규분포는 일부 값을 제외하고 (화순 K, 나주 K, 구미 OM) 평균값 (mean)이 중앙값 (median)보다 큰 양의 부호를 갖는 전형적인 양성왜도

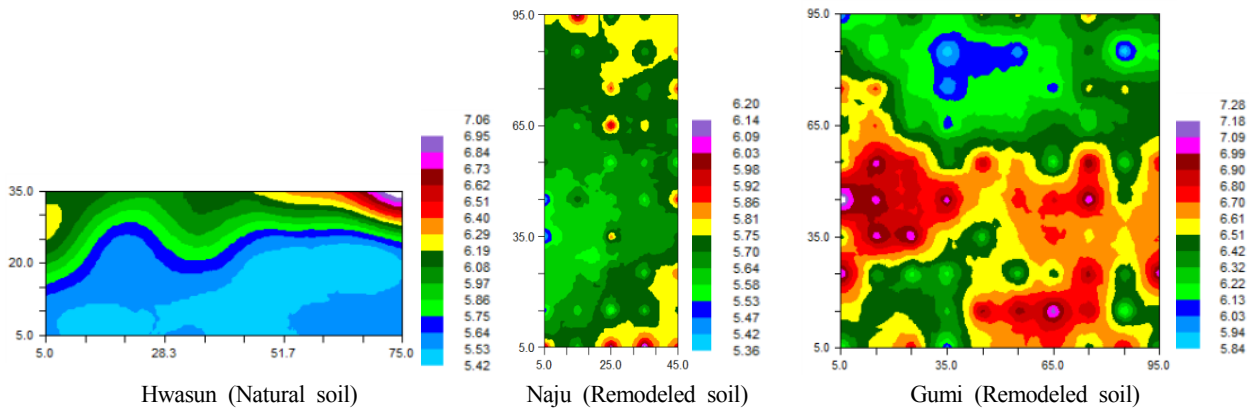


Fig. 2. Kriging analysis of pH value on sample soils.

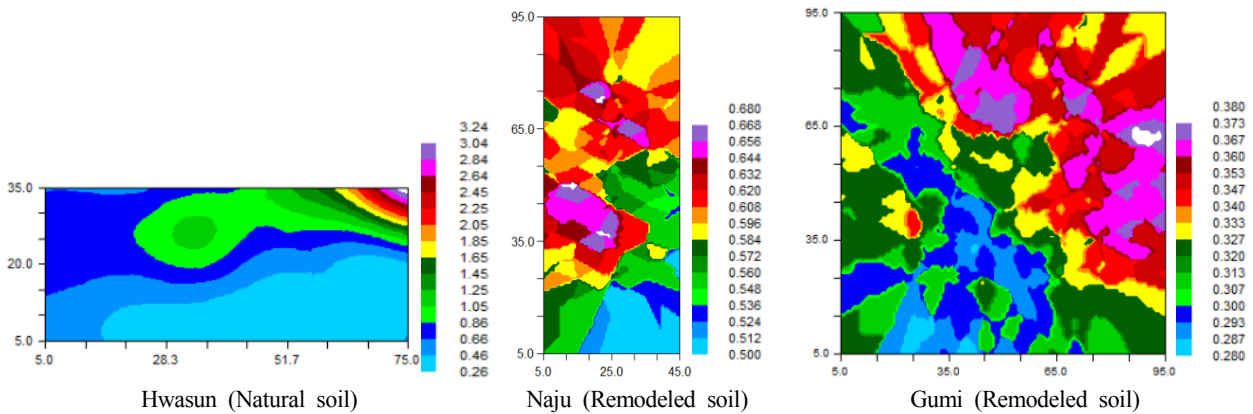


Fig. 3. Kriging analysis of EC value on sample soils.

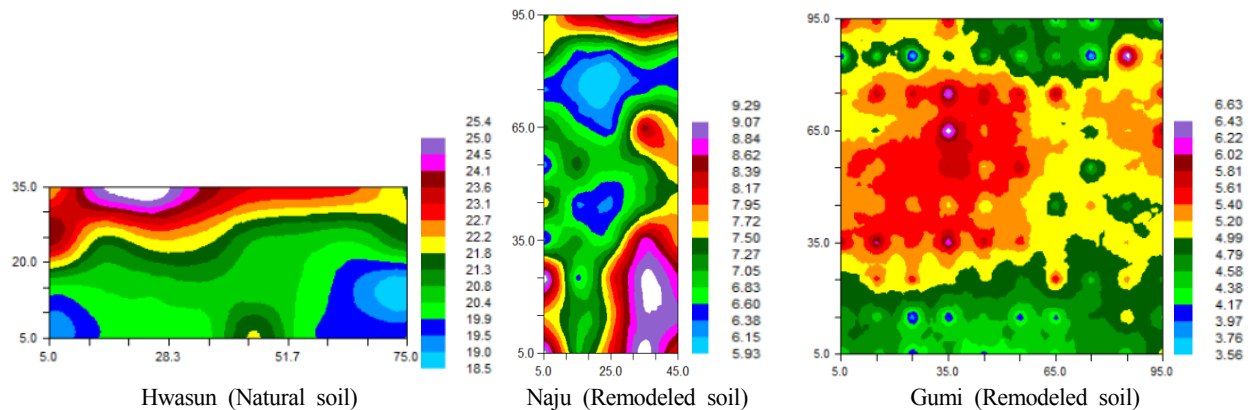


Fig. 4. Kriging analysis of organic matter on sample soils.

(positively skewed)의 분포특성을 보여주었다.

Fig. 2~7은 이상의 결과에 기초해 각각의 포장의 성분별 크리깅 지도를 보여주고 있다. Variogram 분석의 결과와 같이 일반 농경지인 화순지역은 전반적으로 성분별 변이가 북동 부분의 높은 값을 중심으로 일정한 패턴의 그림을 보여주고 있는 반면, 매립적토형 인위토양인 나주와 구미 지역은 전반적인 형태가 불규칙한 것으로 나타나고 있다.

Table 2는 공간의존성의 지표 값을 표시한 것으로, 일반 농경지인 화순 토양의 경우 각각의 성분들의 의존거리를 표

시하는 Range의 값은 21.8~43.5의 범위를 보였으며, 매립적토형 인위토양인 나주, 구미는 각각 4.4~70.6, 5.3~46.3의 범위를 보였다. 포장별 Range값을 보았을 때 일반 농경지인 화순지역 토양은 비교적 균일한 분포를 보여 각각의 성분의 값을 분석하기 위한 시료채취 간격이 비교적 비슷한 결과를 보여주고 있으며, 나주의 경우는 pH (4.4), 유효인산 (5.1), K (11.4)의 화학성을 분석하기 위해서는 EC (42.1), Mg (70.6)에 비해 더 많은 지점의 시료를 채취해야 할 것으로 분석되었다. 구미지역의 range값은 pH 9.4, 유기물 5.3,

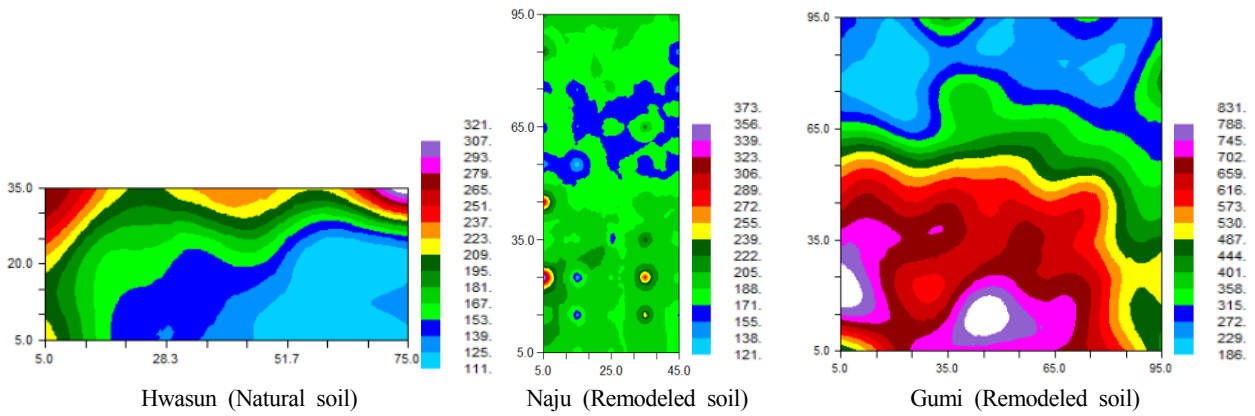


Fig. 5. Kriging analysis of available phosphate on sample soils.

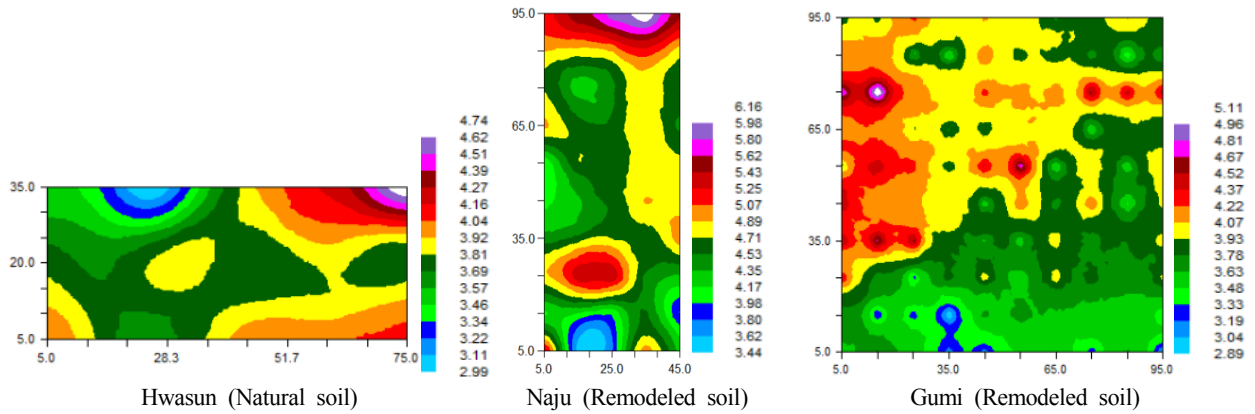


Fig. 6. Kriging analysis of exchangeable Ca cation on sample soils.

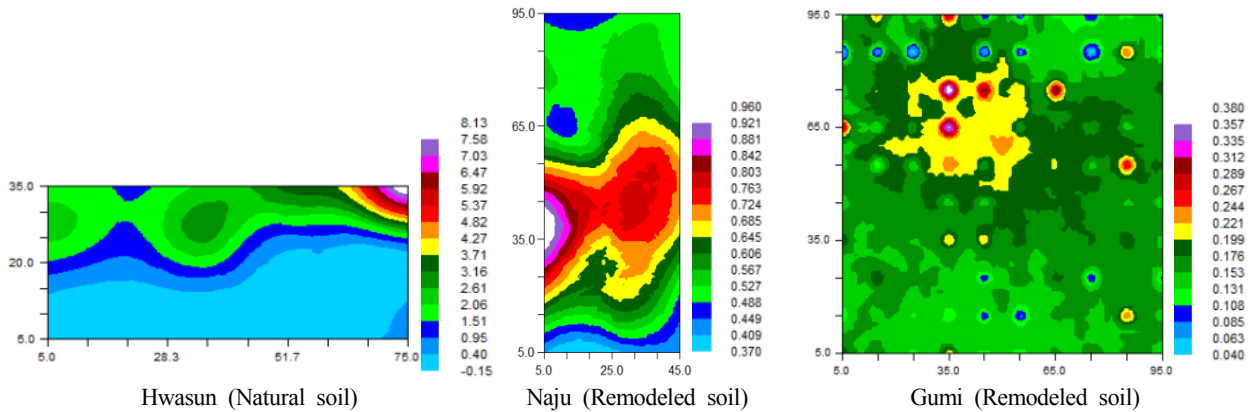


Fig. 7. Kriging analysis of exchangeable Mg cation on sample soils.

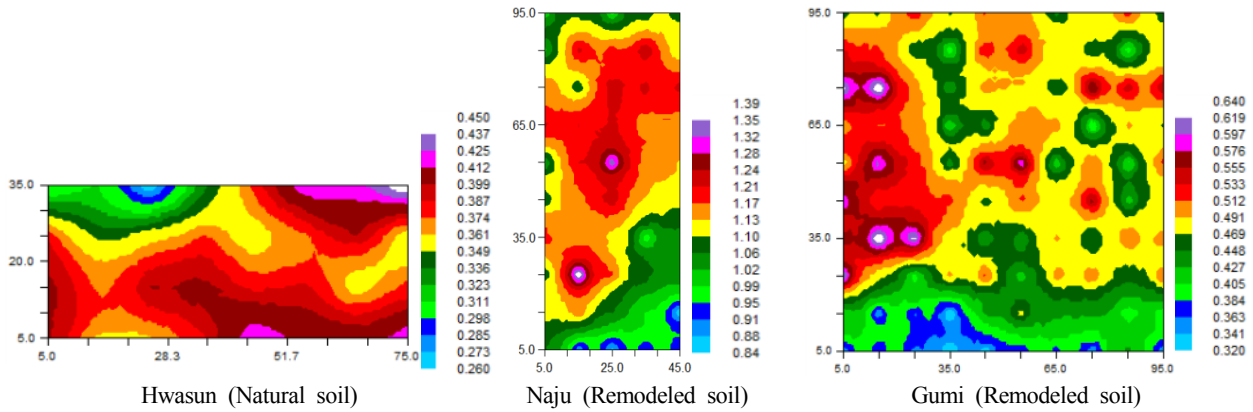


Fig. 8. Kriging analysis of exchangeable K cation on sample soils.

Table 2. The variogram model and range of soil chemical properties.

| Soils | Items | Nugget (C_0) | Sill (C_0+C) | Range (A_0) | R^2 | Model |
|--------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-------|-------------|
| Hwasun (Natural soil) | pH | 0.093 | 0.365 | 34.9 | 0.998 | Gaussian |
| | EC | 0.185 | 1.013 | 43.5 | 0.997 | Gaussian |
| | OM | 0.340 | 4.308 | 21.8 | 1.000 | Gaussian |
| | Avail. P_2O_5 | 1170 | 6,450 | 34.2 | 0.994 | Gaussian |
| | Exch. Ca | 0.078 | 0.243 | 35.0 | 0.995 | Gaussian |
| | Exch. Mg | 1.550 | 6.446 | 32.4 | 1.000 | Gaussian |
| | Exch. K | 0.000 | 0.002 | 31.7 | 1.000 | Spherical |
| Naju (Remodeled soil) | pH | 0.000 | 0.040 | 4.4 | 0.117 | Exponential |
| | EC | 0.054 | 0.054 | 42.1 | 0.631 | Linear |
| | OM | 0.050 | 1.038 | 22.1 | 0.910 | Spherical |
| | Avail. P_2O_5 | 421 | 3,545 | 5.1 | 0.090 | Exponential |
| | Exch. Ca | 0.008 | 0.230 | 20.0 | 0.689 | Spherical |
| | Exch. Mg | 0.014 | 0.106 | 70.6 | 0.990 | Gaussian |
| | Exch. K | 0.000 | 0.015 | 11.4 | 0.890 | Exponential |
| Gumi (Remodeled soil) | pH | 0.019 | 0.167 | 9.4 | 0.892 | Exponential |
| | EC | 0.010 | 0.010 | 53.0 | 0.195 | Linear |
| | OM | 0.003 | 0.629 | 5.3 | 0.359 | Exponential |
| | Avail. P_2O_5 | 3,000 | 47,100 | 46.3 | 0.982 | Gaussian |
| | Exch. Ca | 0.000 | 0.188 | 7.7 | 0.665 | Exponential |
| | Exch. Mg | 0.001 | 0.001 | 6.2 | 0.059 | Gaussian |
| | Exch. K | 0.000 | 0.006 | 10.3 | 0.927 | Exponential |

Ca 7.7, Mg 6.2, K 10.3으로 낮아 상당히 불균일한 것으로 분석되었다. 매립적토형 인위토양인 나주와 구미지역 토양의 pH는 대조토양에 비해 약 8배, 4배의 차이를 보였으며, EC의 경우는 큰 차이를 보이지 않았다. 유기물의 경우는 일반 농경지인 화순 토양과 구미토양이 약 4배의 차이를 보였으며, 유효인산의 경우 나주지역 토양이 일반 농경지 토양과 약 7배의 차이를 보였다. 양이온의 경우도 일반 농경지 토양에 비해 적게는 약 2배에서 5배의 차이를 보여 비교적 매립적토형 인위토양의 화학성이 불균일한 것으로 분석되었다. 따라서 매립적토형 인위토양인 구미, 나주지역은 표토 화학성 분석을 위해서는 현재 10 m 간격의 시료채취 간

격보다 더 작은 약 5 m 간격이 적정시료 채취 간격인 것으로 분석되었고, 조립질 인위토인 구미 지역은 pH, 유기물, 치환성 Ca, 치환성 Mg의 화학성 분포가 특히 불 균일하였다. 따라서 매립적토형 인위토양인 구미와 나주 지역의 포장은 숙답화와 안정화 측면에서 지속적인 모니터링과 경운 횟수의 증가 등 토양관리가 필요하다 판단되었다.

Conclusion

국내에서는 2008년 하반기부터 4대강 사업으로 인하여 저지대에 속하는 농경지를 대상으로 리모델링 사업이 추진

되어 매우 규모가 큰 매립적토형 농경지가 조성되게 되었다. 이러한 매립적토형 인위토양은 토양구조를 악화시켜 여러 문제점을 유발하고 있으며, 이에따른 기술적 문제들이 발생되고 있다. 따라서 본 연구에서는 3개 지구의 토양시료를 채취하여 지구통계 기법인 반분산분석 및 kriging 분석을 통하여 일반농경지와 리모델링 농경지간의 차이를 살펴 보았다. 그 결과 화학 성분들의 의존거리를 표시하는 Range (A_0)값이 일반토양(화순)은 21.8~43.5의 범위를 보였고, 리모델링 농경지(나주, 구미)는 각각 4.4~70.6, 5.3~43.6의 범위를 보여 리모델링 농경지가 상대적으로 불균일한 결과를 보였으며, kriging map 또한 적토형 인위토양에서의 패턴이 불규칙한 것으로 나타났다. 따라서 적토형 인위토양은 포장내의 적절한 화학성의 균일도를 유지할 수 있는 방안을 강구해야 할 필요성이 있다.

References

- Chung, S.O., J.H. Sung, K.A. Sudduth, S.T. Drummond, and B.K. Hyun. 2000. Spatial variability of yield, chlorophyll content, and soil properties in a Korean rice paddy field. In Proceedings of 5th International Conference on Precision Agriculture. Unpaginated CD-ROM. Madison, Wisc.: ASA, CSSA, and SSSA.
- Chung, S.Y. 1993. Application of universal kriging for modeling a groundwater level distribution 1. Intrinsic random function of order k. *J. Eng. Geo.* 3(1):39-49.
- Journel, A.G. and C.J. Huijbregts. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, pp. 600.
- Jung, K.Y., E.S. Yun, K.D. Park, and C.H. Park. 2010. Evaluation of drainage improvement effect using geostatistical analysis in poorly drained sloping paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6):804-811.
- Lee, C. K. 2001. Mapping of field information and development of yield sensor for precision agriculture in paddy field. pH. D. Thesis. (In Korean)
- Lee, C.K., Y.K. Sonn, J.H. Sung, I.G. Jung, S.C. Kim, W.P. Park, and W.K. Park. 2002. Geostatistical analysis of spatial variability for field information in paddy field. *Kor. J. Intl. Agri.* 14(2):127-138.
- NIAST. 2000. *Analytical methods of soil and plant*. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Park, C.S., J.J. Kim, and S.J. Cho. 1984. Analysis of spatial variability for particle size distribution of field soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 17(3):212-217.
- Park, C.S., S.C. Yang, G.J. Lee, J.T. Lee, H.M. Kim, S.H. Park, D.H. Kim, A. Y. Jung, and S.W. Hwang. 2006. Spatial variability of soil moisture content, soil penetration resistance and crop yield on the leveled upland in the reclaimed highland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(3):123-135.
- Park, M.E. 1987. Spatial variation analysis of soil characteristics and crop growth. Seoul National Univ. pH. D. Thesis. (In Korean)
- Park, M.E. and S.H. Yoo. 1989. Spatial variation analysis of soil characteristics and crop growth across the land-partitioned boundary. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 22(3):163-172.
- Park, M.E. and S.H. Yoo. 1989. Spatial variation analysis of soil characteristics and crop growth across the land-partitioned boundary. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 22(3):163-172.
- Robertson, G. P. 1998. *Geostatistics for the environmental sciences*, Gamma Design Software, Plainwell, Michigan.
- Sohn, Y.M., G.Y. Jeon, J.D. Song, J.H. Lee, and M.E. Park. 2009. Effect of spatial salinity variation on the emergence of soiling and forage crops seeded at the newly reclaimed tidal lands in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(3):172-178.
- Sonn, Y.K., Y.S. Zhang, C.W. Park, Y.H. Moon, B.K. Hyun, K.C. Song, and H.C. Chun. 2012. A Comparison of spatial variation on anthropogenic soils. *Korea J. soil Sci. Fert.* 45(6):897-899.