

고령지 개간지 밭의 토양수분과 경도 및 작물수량의 공간변이성

박철수* · 양수찬¹ · 이계준² · 이정태² · 김학민¹ · 박상후¹ · 김대훈¹ · 정아영¹ · 황선웅²

KT&G 중앙연구원 생물자원연구소, ¹강원대학교 자원생물환경학과, ²농촌진흥청 고령지농업연구소

Spatial Variability of Soil Moisture Content, Soil Penetration Resistance and Crop Yield on the Leveled Upland in the Reclaimed Highland

Chol-Soo Park*, Su-Chan Yang¹, Gye-jun Lee², Jeong-Tae Lee², Hak-Min Kim¹, Sang-Hoo Park¹, Dae-Hoon Kim¹, Ah-Yeong Jung¹ and Seon-Woong Hwang²

Bio-resources group, KT&G Central Research Institute, Suwon 441-480, Korea

¹Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

²National Institute of Highland Agriculture, RDA, Pyeongchang 232-955, Korea

Spatial variability and distribution map of soil properties and the relationships between soil properties and crop yields are not well characterized in agroecosystems that have been land leveled to facilitate more cultivation of the new reclaimed sloping highland. Potato, onion, carrot, Chinese cabbage and radish were grown on the coarse sandy loam soil in 2004. Soil moisture content, soil penetration resistance and crop yield were sampled in the 10 m × 50 m field consisted of five plots. Sampling sites of each cultivation plot were 33 for the soil moisture, 11 for the soil penetration and 33 for the crop yield.

The results of semivariance analysis, most of models were shown spherical equation. The significant ranges of each spatial variability model for the soil moisture, soil penetration and crop yield were broad as 33-35 meters in the potato cultivation plot, and that in the Chinese cabbage cultivation plot was narrow as 5-6 meters. The coefficient of variances (C.V.) of moisture, penetration and yield were various from 14 to 59 percents in five cultivation plots. The highest C.V. of potato yield was 59 percents, and that of the radish cultivation plot was as low as 14 percents. The required sample numbers for the determination of soil moisture content, soil penetration resistance and crop yield with error 10% at 0.05 significant level were ranged 8-40 for soil moisture, 7-25 for soil penetration and 424-4,678 for crop yield.

The variogram and distribution map by kriging described field characteristics well so that the spatial variability would be useful for soil management for better efficiency and precision agriculture in the reclaimed highland.

Key words : Spatial variability, Reclaimed upland, Highland, Soil moisture, Soil penetration

서 언

1970년대의 개간은 경사가 심한 곳은 계단식 개간을 하고 경사가 낮은 곳은 원지형을 살려서 개간 (Shin et al., 1974)을 하였으나, 오늘날의 개간은 중장비를 동원하여 지형을 바꾸는 대단위 개간을 하고 있다. 특히 고령지 농업의 대표지역인 강원도 평창의 대관령 일대는 많은 밭들이 산을 절토하여 하단부분의 낮은 곳에 성토를 함으로써 밭을 평탄화하거나 경사도를 낮추어 농작업의 편의성을 확보하기 위한 작업을 하고 있다. 산을 깎아서 성토하여 밭을 조성하게 되면

토양의 안정이 부분적으로 상이하게 발생하여 유효토심이 전반적으로 불균일하게 되며, 이에 따라 토양수분, 밀도 및 경도가 동일한 포장 내에서도 다양하게 분포하게 되어 지점에 따라 생육이 크게 차이가 난다 (Kim et al., 1981).

작물생육은 토성, 수분함량, 경도, 통기성, 온도 등의 영향을 받으며 (Cho and Kim, 1997; Gupta, 1994), 토양의 경도가 너무 높으면 뿌리가 신장하지 못하므로 생육이 나쁘게 된다. 토양경도는 수분상태 및 용적 밀도에 의하여 영향을 받게 되고 투수성 및 통기성과 밀접한 관계 (Taylor et al., 1966; Jo et al., 1983; 1997)가 있다. Ryu and Eom (1986)은 관수에 의한 봄배추의 증수효과는 표준시비하에서 potential을 -0.2 bar로 유지시켜줄 경우 무관수 대비 221% 증수되었

접 수 : 2006. 3. 21 수 리 : 2006. 5. 22
*연락처 : Phone: +82314001546,
E-mail: 20060123@ktng.com

고 봄무는 64% 증수되었다고 하여 작물생육에 수분 조건이 대단히 중요함을 시사한 바 있으며, Kim et al. (1997a, 1997b)의 조사결과에 의하면 토양교란 3년 후에 지표면으로부터 20-30 cm에 농업의 현대화 및 기계화에 의한 토층의 압밀이 심화되어 경반층이 형성되며, 이러한 경반층은 토양수의 하향 이동을 방해하여 공간적 변이성이 나타난다고 하였다. 쟁기층을 기점으로 높아지는 전용적 밀도는 물의 수직흐름을 지연함에 따라 (Brady, 1980; Patel and Sigh, 1981) 경계면을 따라 수평이동이 상대적으로 증가되기는 하나 전체적으로 물질의 이동이 제한되어 경작층 내 머무름이 발생할 것으로 보이며 (Kim et al., 1997b), 이러한 현상은 포장에 균일하게 발생하는 것이 아니라 토양조건에 따라 그 정도가 달라져 공간적으로 변이가 발생하게 된다. 공간변이성을 구현할 수 있는 좋은 방법은 variogram과 kriging의 특성을 평가하여 정량화하지 못하는 곳들의 공간연속성을 해명하여 분포도를 작성하는 것이다 (Journel, 1996; Myers, 1986).

우리나라에서 밭 토양의 수분과 경도에 대한 연구 (Cho and Kim, 1997; Hur et al., 1984; Jo et al., 1983; Jo et al., 1977)와 공간변이성에 대한 연구 (Park and Yoo, 1989; Park, 1987; Park et al., 1984a; 1984b; 1984c)는 수행된 바 있으나, 경사지를 절토와 성토하여 개간한 밭에서 수분과 경도의 분포도를 작성하고 이를 작물수량의 분포와 비교하거나 공간변이성에 대해 평가한 연구는 미흡한 실정이다.

이 연구는 경사지를 개간하여 평탄화한 밭에서 수분과 경도 및 작물수량에 대한 분포도를 작성하여 그 변이를 평가하고, 고령지 경사지에서 절토와 성토로 밭을 조성할 때 나타나는 공간변이성을 구명하여 고령지 채소재배지의 토양관리에 활용하고자 수행하였다.

재료 및 방법

시험 대상지 포장 개요 시험장소 및 배경-시험장소는 해발 780 m의 강원도 평창군 도암면 황계리 고령지농업연구소 인근의 개간지로 2001년에 야산을 절토 및 성토하여 평탄한 포장을 조성하였다 (Fig. 1). 조성 후 1년은 시험을 하지 않고 안정화시키는 기간을 두었으며 2002년과 2003년에 부산물퇴비를 투입하고 호밀을 재배하여 포장에 환원시켰다. 토양층은 절토 및 성토에 의해 형성된 인위토로 구분할 수 있으며 토성은 사양토이며 성토 깊이는 1 m 이상이다. 성토시에 토양을 균일하게 하기 위하여 산의 표토를 제거한 C층 토양을 주로 사용하여 토성은 대체로 균일

한 곳이다 (Fig. 1). 그러나 개간 전의 지형적인 특성과 조성시에 중장비에 의한 불균일한 답압은 개간 후에도 영향을 주어 토양의 수분이 개간 전의 지형과 개간 과정에 영향을 받아 한 곳으로 집중되는 현상이 나타나고, 토심의 깊이 역시 지형과 답압에 영향을 받아 깊이가 일정하지 않을 뿐만 아니라 경도의 분포도 지점별 및 깊이별로 균일하지 않았다. 포장은 5개로 구분하여 고령지 주요작물인 감자, 배추, 무, 당근, 양파를 재배하였으며, 각 작물의 재배면적은 500 m² (50m × 10m)이었다.



Fig. 1. Photography showing reclamation and leveling of mountainous land.

토양의 이화학적 특성조사 시험 전 토양의 이화학성은 채취한 토양을 풍건 후 2 mm 체로 쳐서 분석에 사용하였다. 토양조사는 토성, 유기물, 산도, 전기전도도, 질산태질소, 암모늄태질소, 유효인산, 양이온에 대해 수행하였으며, 토성은 피펫법으로 입자의 함량을 분석한 후에 미농무성에서 제시한 토성삼각도에 의해 결정하였다 (Miller and Gardiner, 2001). 유기물은 일정량의 토양을 0.5 mm 체를 통과할 수 있도록 갈아서 Tyurin법으로 분석하였고, 토양 산도는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 하여 1시간 저어준 후 초자전극 (Orion, model 370, USA)을 사용하여 측정하였다. 질산태질소와 암모늄태질소는 2 M KCl로 추출하여 Kjeldahl 증류장치를 이용하여 증류 후 0.005 N H₂SO₄로 역적정하여 정량하였고, 유효인산은 Lancaster법으로 분석하였으며, 양이온은 1 M NH₄OAc로 치환추출한 후 원자흡광광도계 (Hitachi, Z-6000, Japan)로 분석하였다.

수분 및 경도조사 토양의 수분함량은 8월 12일에 5 m × 5 m 간격으로 Oh et al. (1998)이 개발한 유전율식 토양수분센서를 사용하여 조사를 실시하였다 (Fig. 2a). 토양의 경도 조사는 0-80 cm까지 1 cm 간격으로 측정할 수 있는 경도계 (Eijkelkamp,

Penetrologger, Netherlands)를 이용하여 각 처리구별로 5 m 간격으로 11개 지점에서 조사하였다 (Fig. 2b). 각 재배구의 수분과 작물의 생체중은 재배구별로 33개 지점을 조사하였고, 경도는 11개 지점에서 조사를 하였다. Figure 2a는 수분과 작물을 조사한 지점을 나타내고, Figure 2b는 경도를 조사한 지점을 나타내고 있다.

작물재배 및 조사 시험작물은 고령지의 주요작물인 감자, 배추, 무, 당근, 양파였으며, 감자는 5월 6일에 파종하여 9월 10일에 수확, 배추는 6월 29일에 정식하여 8월 25일에 수확, 무는 6월 25일에 파종하여 9월 15일에 수확, 양파는 5월 14일에 정식하여 9월 5일에 수확, 당근은 5월 20일에 파종하여 8월 30일에 수확하였다. 시비량 및 분시는 1999년에 발간된 농업과학기술원의 작물별 시비처방기준의 노지재배법에 준하였다. 생육조사는 수확기에 이루어졌으며, 감자는 괴경, 배추는 지상부, 무와 당근은 뿌리, 양파는 구를 5 m × 5 m 간격으로 채취하여 주당 생체중을 측정하였다 (Fig. 2). 조사된 작물생육, 수분함량 및 토양경도의 variogram 분석은 GS+ 프로그램 (Version 3.1, Gamma Design Software, Plainwell, MI, USA)을 사용하였고, Surfer (Golden Software, Inc., Golden, CO, USA) 프로그램을 이용하여 분포도 (contour map)를 작성하였다.

Semivariance 분석 고령지 개간지에서 표층 토양의 수분, 경도 그리고 작물 수량 (수확기 생체중)의 공간적 이질성의 한계와 분포를 지질통계학적 분석방법으로 정량화하였다. 지질통계학적 방법은 각 지점에서 측정된 값들의 자기상관 (autocorrelation)의 등급을 평가하는데 사용되고, 각 측정점 사이의 값은 kriging에 의해 내삽되고 분포도로 그려지게 된다 (Mohammed, et al., 2006; Trangmar, et al., 1985; Vieira, et al., 1983). 측정점 사이의 값에 대한 내삽은 semivariance 통계예측, 즉 variogram $\gamma(h)$ 을 이용하

는 다음 식에 의해 수행한다 (Mohammed et al., 2006; Myers, 1997; Nathan et al., 2004).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (1)$$

여기에서 $N(h)$ 는 lag (전장, separation distance) 간격 (h)에 의해 분리된 쌍들의 수를 나타내고, $Z(x)$ 는 x 위치의 값이며, $Z(x+h)$ 는 x 위치로부터 lag 거리가 h 만큼 떨어진 위치의 값을 나타낸다.

본 조사에서 사용된 variogram은 spherical (2)-(4), linear (5), exponential (6) 모형이었다. Spherical 모형은 variogram에서 가장 많이 사용되는 것으로 기울기가 급격히 증가하다가 완만한 평형을 이룬다.

$$\gamma(h) = c \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right] + C_0 \quad h \leq a \quad (2)$$

$$\gamma(h) = C - C_0 \quad h > a \quad (3)$$

$$\gamma(0) = 0 \quad (4)$$

여기에서 a 는 범위 (range)를 말하고, C_0 는 nugget effect를 나타내며, $C+C_0$ 는 sill을 의미한다. Linear와 exponential 모형의 h 는 lag distance를 나타낸다.

Linear 모형은 선형으로 증가하는 경향을 보이는 모형으로 sill에 도달하지 않으나 lag가 증가하게 되면 조합수는 감소하기 때문에 신뢰성이 저하되므로 보통 최대 lag의 50-60%를 유효하게 semivariogram에 표현한다.

$$\gamma(h) = C_0 + \frac{h}{a} \quad (5)$$

Exponential 모형은 spherical과 유사하나 더 연속적인 과정을 포함하고 있으며, 초기에는 급속히 증가하다가 완만한 비율로 평형을 이룬다. 이 모형은 kriging 동안 (-) 부분이 생길 수 있으므로 이에 유의하여야 한다.

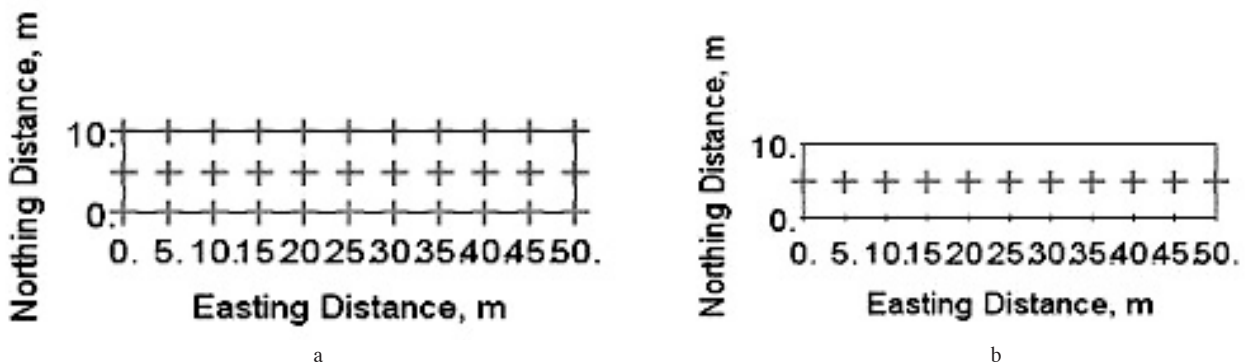


Fig. 2. Measurement points for soil moisture content and crop yield (a), and measurement points for soil penetration resistance (b).

$$\gamma(h) = C_0 - C[1 - \exp(-\frac{|h|}{a})] \quad (6)$$

Semivariance는 lag의 증가와 함께 증가하고, 그대로 무한히 증가하는 경우도 있지만 일반적으로 어느 거리에서 최대값에 도달하는데, 이 최대값을 sill이라 한다. Sill에서 nugget을 뺀 값은 전체 자료의 분산과 거의 비슷하며, sill에 도달했을 때의 lag를 range라고 말한다. Range는 공간의존성의 한계를 의미하는 것으로 실측한 두 지점 이상의 자료로부터 사이에 존재하는 측정하지 않은 값을 예측할 수 있는 범위, 즉 데이터의 내삽이 가능한 범위를 표시하는 중요한 값이다. 그리고 이론적으로 lag를 0에 무한히 접근시키면 semivariance는 0으로 되어야 하지만 실제로는 정의 값을 갖는데, 이를 nugget effect라 하며, nugget은 시료 채취 간격 이하의 공간변이와 실험오차 등의 설명할 수 없는 우연의 변이로 판단된다 (Yu, 2003).

시료의 측정수 결정 표준편차의 크기를 이용하여 신뢰한계를 지배하는 측정수 (시료수)를 결정할 수 있다 (Park, 1987). 표준편차가 σ 일 때 주어진 확률 a 수준에서 표준단위의 값이 X_a 이라면 필요 측정수 N 은 모평균 μ_E 에 대한 신뢰수준단위 d 에 대하여 식 (7)이 성립된다.

$$N = \frac{X_a^2 \sigma^2}{d^2} \quad (7)$$

여기서 d 는 정확성의 요구정도와 E의 곱으로 결정된다.

결과 및 고찰

조성된 시험포의 토양은 사양토로 유기물의 함량은 우리나라 밭토양의 평균과 비슷한 수준이었으나 유효인산의 함량과 칼슘 및 마그네슘의 함량이 낮았다. Lee et al. (2002)도 석비레 (saproliite)에 가까운 모재토를 성토한 밭토양은 유기물의 함량이 낮고, 인산의 고정능력이 강하며, 칼륨과 마그네슘 및 유효인산의 함량이 기경지 밭토양에 비하여 현저히 적다고 하였다. 따라서 평탄작업이 이루어진 토양은 질소와 인산이 작물생육의 주요 제한 인자가 될 수 있다

(Robbins et al., 1997, 1999; Eck, 1987; Whitney et al., 1950). 본 시험포장에서 유기물의 함량이 낮지 않은 것은 포장 조성된 후 포장을 안정화시키고 작물생육에 적합한 포장을 조성하고자 실시한 2회에 걸친 부산물퇴비의 시용과 2년간의 호밀 밀식재배 후에 반전투입한 것에 기인하는 것으로 생각된다. 그리고 칼슘과 마그네슘의 함량이 낮은 것으로 미루어 심층의 모재로 새로 조성된 토양은 지력을 높이기 위해 유기물의 투입과 물리성에 도움이 되는 작물을 심는 것도 중요하지만 토양의 양분균형을 함께 고려해야 할 것으로 판단된다.

토양수분의 분포 Fig. 3은 강우량이 8월 1일부터 5일까지 87 mm 발생 8일 후인 13일에 측정된 표층토의 수분 분포도이다. 각 재배구의 수분분포도는 Table 2에서 제시한 모형을 따라서 작성하였다. 강우에 의해 균일하게 공급된 조건임에도 불구하고 강우 후 수분함량의 분포에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 강우 발생 후 8일 이상의 시간이 경과한 후에 나타난 본 시험의 분포도에서 수분의 분포가 불균일적이고 균일하지 못한데, 이는 표면의 경사를 균일하게 조성하여도 포장 조성전의 지형이나 경도에 영향을 받는다는 것을 의미한다. 이러한 불균일한 토양조건은 토양에 과잉의 수분이 공급되거나 강우가 많이 발생할 경우 토양표면과 내부에서 물이 발의 일부에 집중될 수 있음을 의미하며, 평탄화에 의해 발은 토양구조 (Flanzuebbbers, 2002; Watts et al., 2001), 투수 (Flanzuebbbers, 2002), 수분보유능 (Haynes and Naidu, 1998)에 영향을 받게 되는데 이러한 물리적 변화는 수분과 밀접하여 결국 수분의 분포에도 영향을 주게 되며, 나아가 이러한 영향이 부정적으로 작용하여 토양의 침식을 가중시킬 수 있고 (Brye et al., 2004), 토양과 수분의 손실과 함께 양분을 농경지 밖으로 유도하여 농경지내에서는 토양과 양분의 유실로 인한 경제적 손실을 발생시키게 될 뿐만 아니라 외부적으로 수계에 오염원을 발생시키는 원인이 될 수 있다. 균일하지 못한 물리적 조건은 화학적인 분포에도 영향을 주게 되어 결국은 물리적인 조건과 화학적인 조건에 민감한 작물생산에 있어 균형적이고 안정적인 생산에 악영향을 받을 수 있다.

Table 1. Means and ranges of the soil properties sampled from the five cultivated plots before experiment.

	Soil texture	pH (1:5)	O.M.	NH ₄ -N	NO ₃ -N	Av. P ₂ O ₅	Exchangeable cations		
							Ca	Mg	K
			g kg ⁻¹	-----mg kg ⁻¹ -----			-----cmolc kg ⁻¹ -----		
Mean	SL	5.6	27.8	14	17	124	2.0	1.3	0.48
Range		5.5-5.9	24.2-32.4	5-28	5-28	89-183	1.3-2.4	0.8-1.9	0.36-0.64

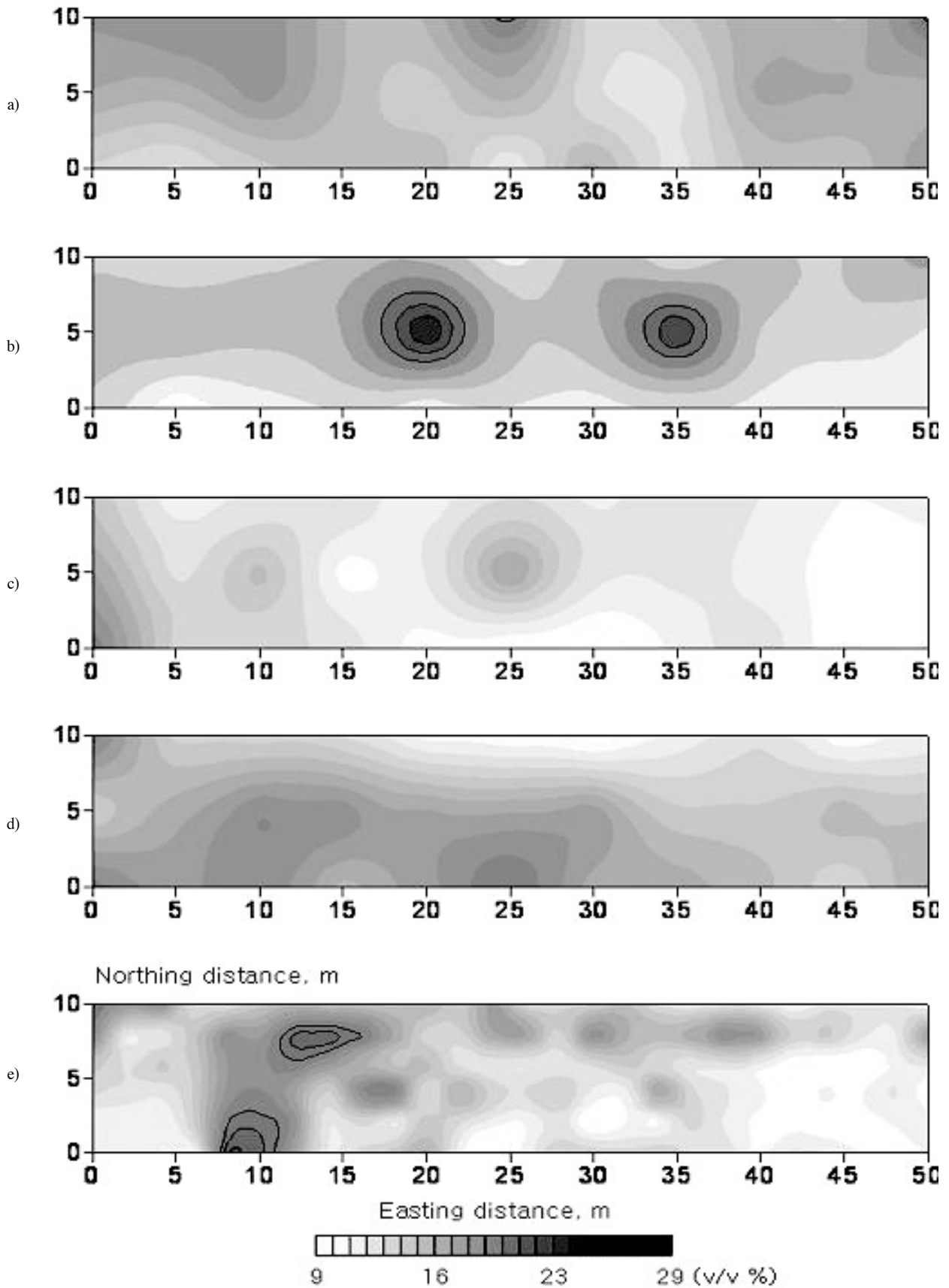


Fig. 3. Kriged maps of the soil moisture contents at day 5 after 87 mm rain. The interpolated values were determined by kriging for each of the investigating points: (a) radish, (b) Chinese cabbage, (c) carrot, (d) onion and (e) potato cultivation plot.

수분의 분포는 감자와 양파를 재배한 포장은 왼쪽의 수분함량이 높게 분포하였고, 배추를 재배한 포장은 가운데 부분이 수분의 함량이 높았으며, 무를 재배한 포장은 가운데와 양쪽 가장자리 부분이 다소 높은 것으로 나타났다. 수분분포도에서 양파와 당근 재배구의 수분이 다소 낮게 분포한 것은 두둑을 넓고 높게 형성한 것에 기인하는 것으로 생각되고, 수분조사는 두둑의 중앙에서 조사하였기 때문에 수분분포가 타 재배작물과 비교하여 값의 범위 폭이 좁고 수분함량이 낮게 나타난 원인으로 판단된다. 따라서 골을 깊게 파고 두둑을 높게 하는 양파와 당근재배지는 수분의 공간적 변이가 적을 것으로 생각된다.

각 작물재배구의 수분함량의 lag에 따른 variogram은 감자, 양파, 배추, 무는 Spherical, 당근은 Exponential 모형을 따랐다 (Fig. 6, Table 3). 수분분포도의 작성을 통해 동일 토양으로 같은 시기에 조성한 포장임에도 불구하고 수분의 분포가 다양하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

토양경도의 분포 각 시험구의 경도를 깊이별로 살펴보았을 때, 평균적으로 깊이가 깊어질수록 증가하는 경향을 보였으며, 0-20 cm까지는 경도값이 다른 깊이에 비해 증가폭이 크게 나타났고, 20-50 cm 깊이는 대체로 완만한 증가를 이루다가 50 cm 이하의 깊이에서는 경도치의 변이 폭이 심한 것으로 조사되었다 (Fig. 4). 경작이 장기간 이루어진 일반적인 밭의 경우에는 경도가 15 cm 정도에서 경운이나 농작업, 그리고 작은 입자들이 토양공극을 따라 내려가 쌓인 것 등에 의해 경도가 급하게 높아졌다가 다시 낮아지는 경향을 볼 수 있으나 (Park, 2002) 석비레 사양토로 높게 성토하여 새로 개간한 밭의 경우는 그 층이 명확하게 나타나지 않았다. 석비레 사양토에 의해 조성된 본 시험조건의 밭에서 30 cm 이하의 깊이에서 평균경도가 3 MPa를 넘는 것으로 보아 30 cm 이하로 뿌리가 뻗는 것은 대단히 어려우므로 석비레 사양토를 이용해서 성토를 하게 되면 유효토심이 쉽게 낮아질 수 있음을 알 수 있다. 또한 석비레는 입자가 굵은 알갱이로 구성되어 있어 공극이 크지만 전체 공극량은 적어서 쉽게 토양이 포화될 수 있다. 불투수층이 형성되어 배수가 용이하지 않다면 포화되어 정체된 수분으로 인하여 작물뿌리가 호흡을 할 수 없어 근권에 심각한 피해를 줄 수 있으므로 경사도가 평지에 가까운 사양토 성토지는 개간과 작물재배 중에 배수 문제를 고려하여야 한다.

Fig. 5는 각 작물의 재배지를 통합하여 분포도를 작성한 것이며, 경도에 토양수분함량을 겹쳐 그려 놓은 것으로 실선은 0-20 cm 깊이의 경도를 나타낸 것이

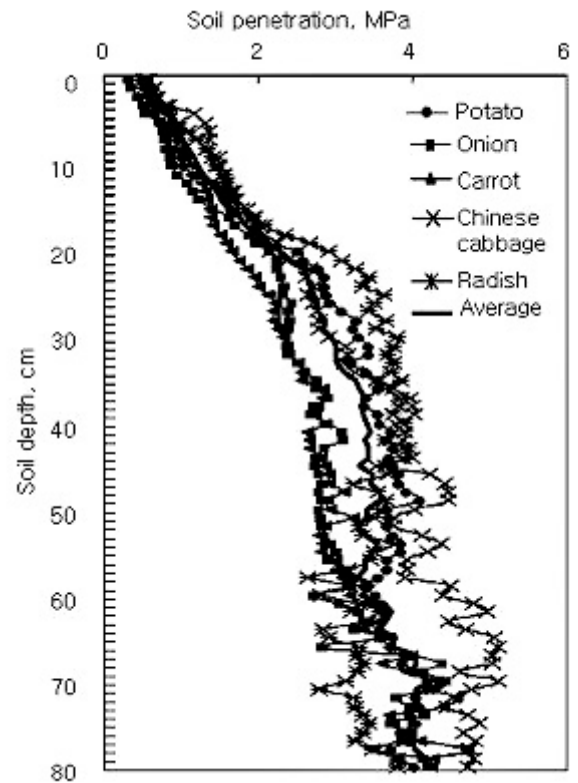


Fig. 4. Distribution map of the soil penetration with soil depth in different cultivation farmland of new reclaimed upland including parent material.

고, 등고선 모양의 흑백명암으로 표현된 것은 0-10 cm의 토양수분함량이다. 분포도는 kriging 기법을 사용하였으며, 적용모형은 spherical을 이용하여 작성하였다. 토양경도와 수분의 분포가 정확히 일치하지는 않으나 대체로 수분함량이 많은 쪽에서 경도가 낮게 나타나는 경향이 있었다. 강우 및 관개 후에 수분의 재분포가 발생하게 되는데, 이때 단일한 포장에서도 변이가 심하여 특히 수분에 민감한 작물의 수량에 변이가 심하게 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 대부분의 작물은 수분조절에 의해 수량의 증감현상이 나타나는데, 특히 Ryu와 Eom (1986)은 관수에 의한 배추의 증수효과는 표준시비하에서 potential을 -0.1~-0.2 bar로 유지시켜 줄 경우 약 60% 증수되었다고 발표하여 수분의 조절이 작물의 생산에 대단히 중요함을 시사한 바 있다. 토양특성의 공간분포도를 농경지에 적용하여 수분이 모이는 곳은 배수대책을 마련하고, 대단위 면적에 적용하여 수분함량이 높은 지역은 수분을 많이 필요로 하는 작물을 재배하고 수분함량이 낮은 지역은 수분에 영향이 적은 작물을 재배하는 등의 계획적인 작물배치에 활용한다면 작물의 안정생산에 효과가 높을 것으로 생각한다.

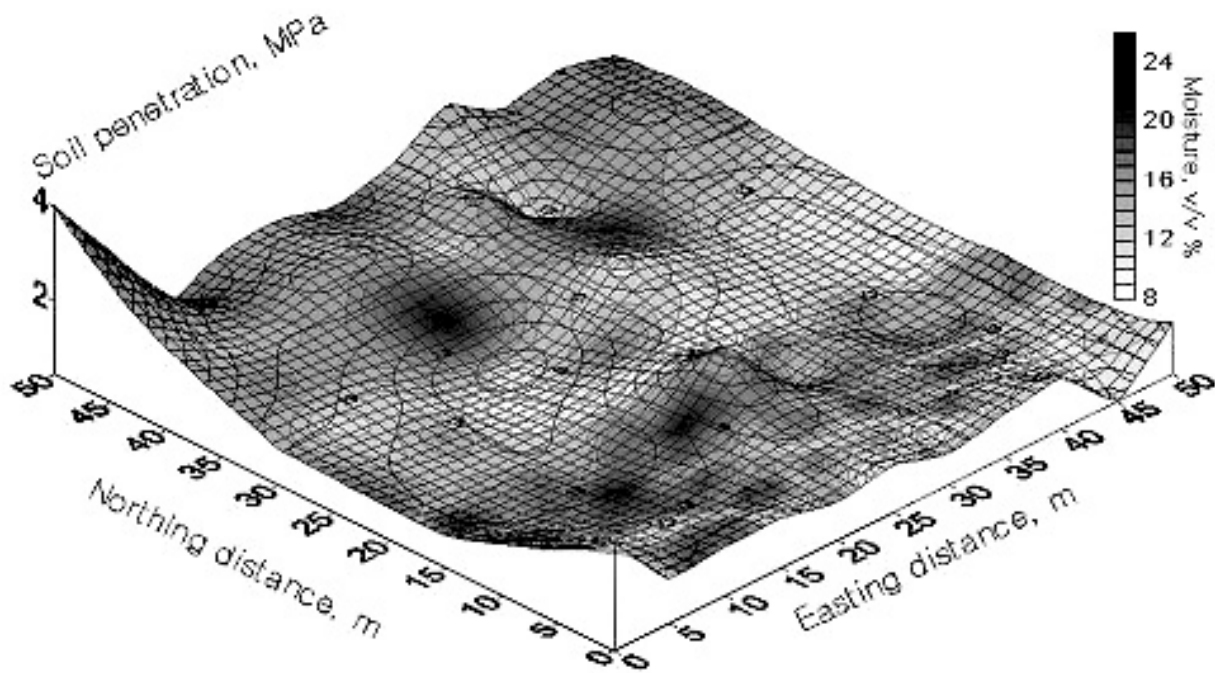


Fig. 5. Distribution map of the soil penetration resistance (cross line) and the soil moisture content (overlay).

수분, 경도, 작물수량의 semivariance Table 2는 각 조사구의 변수에 대한 평균, 최소, 최대값과 표준편차 (standard deviation) 및 변이계수 (coefficient of variance)를 보여주고 있다. 수분의 변이계수가 가장 낮은 재배구는 무를 재배한 곳으로 14%이었고, 수분 함량의 범위는 11.8-20.7 v/v%이었으며, 가장 높은 변이를 보인 곳은 배추재배구로 변이계수 25%에 수분 범위는 9.2-27.8 v/v%로 넓은 분포값을 가지고 있었다. 이러한 결과는 Park (1987)이 양토에서 조사한 포

장용수량의 변이계수 14%보다 무를 제외하고 높은 것으로 나타났는데 양토보다 모래 성분이 많은 사양토로 질토 및 성토한 포장에서 변이가 크게 나타날 수 있음을 의미하는 것으로 생각된다. 경도는 배추재배구에서 변이계수가 25%로 다른 재배구에 비하여 낮게 나타났고, 감자를 비롯한 나머지 재배구는 30% 이상으로 조사 지점간에 변이가 심한 것으로 분석되었다. 수량을 살펴보면, 감자에서 변이계수가 59%로 대단히 높게 나타났고, 그 외의 처리구는 30% 이하의

Table 2. Descriptive statistics of measured point data and estimated soil properties and crop yields.

Cultivated crops	Variables	Units	Mean	Minimum	Maximum	S.D.	C.V. (%)	n
Potato	Moisture(0-10 cm)	v/v%	12.9	9.7	21.3	2.27	18	33
	Penetration(0-20 cm)	MPa	1.44	0.42	2.73	0.54	38	11
	Yield	gm	330	60	674	192.97	59	33
Onion	Moisture(0-10 cm)	v/v%	15.1	9.1	20.1	3.12	21	33
	Penetration(0-20 cm)	MPa	1.06	0.67	2.32	0.46	43	11
	Yield	gm	322	132	546	84.22	26	33
Carrot	Moisture(0-10 cm)	v/v%	12.4	9.1	19.9	2.34	19	33
	Penetration(0-20 cm)	MPa	1.06	0.46	1.75	0.38	36	11
	Yield	gm	201	111	328	45.32	23	33
Chinese cabbage	Moisture(0-10 cm)	v/v%	14.8	9.2	27.8	3.75	25	33
	Penetration(0-20 cm)	MPa	1.43	0.51	1.74	0.36	25	11
	Yield	gm	2008	1310	2600	309.58	15	33
Radish	Moisture(0-10 cm)	v/v%	16.0	11.8	20.7	2.24	14	33
	Penetration(0-20 cm)	MPa	1.68	0.67	4.03	0.91	54	11
	Yield	gm	1804	1078	2732	315.51	17	33

값을 나타내었다. 특히 배추와 무의 수량에 대한 변이 계수는 각각 15%, 17%로 공간적으로 변이가 심하지 않은 것으로 분석되었다. 감자의 수량에서 조사지점 간에 변이가 심하게 나타난 것은 수분의 분포가 높게 나타난 곳과 낮게 나타난 곳의 수량이 현저한 차이를 보인 것에 기인하는 것으로 생각된다.

결정계수로 보았을 때 공간변이 모형을 가장 잘 따르는 시험구는 감자재배구이었고, 변이의 경향이 없어 공간모형을 따르지 않는 것은 배추재배지로 조사되었다. 배추재배지는 수분, 경도, 수량 모두에서 공간 변이성이 경향을 가지고 있지 않았다. 각 모형에 대해 공간적으로 연속성이 있는 거리를 나타내는 range는 감자재배구에서 33-35 m로 고르게 큰 값을 보였고, 배추재배구에서 5-6 m로 모형에 대한 연속성이 낮은 것으로 나타났다. 적용한 각각의 모형에 대해 range와 공간구조 (proportion) 모두에서 가장 강한 값을 나타낸 것은 감자의 수량이었다 (Table 3). 따라서 감자재배구는 모형을 이용해서 임의의 지점에 대한 값을 추정할 수 있으나, 배추재배지의 경우 모형에 대한 range가 짧고 결정계수가 대단히 낮아 임의의 지점에 대한 값의 추정에 오차가 심할 수 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 오차는 분포도 작성에서도 내삽된 값에서 나타날 수 있으므로 공간구조가 약하고 결정계수가 낮은 경우는 조사 간격을 재설정할 필요가 있다.

각 작물재배구의 lag에 따른 variogram은 배추와 무는 수분, 경도, 수량에서 spherical 모형을 따르고 있었고, 당근은 수분에서 exponential 모형을 따랐다 (Table 3, Fig. 6). 그리고 감자의 경도와 수량, 양파의 수량은 linear 모형을 나타내었다. variogram 작성

을 통해 동일 토양으로 같은 시기에 조성한 포장임에도 불구하고 각 항목의 분포가 다양하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

작물 수량분포와 수분 및 경도와와의 관계 Fig. 7은 각 작물재배구의 수량분포도를 나타내는 것으로 Fig. 3의 수분분포도와 비교해 볼 때, 무는 수분분포와 비교적 유사한 경향을 보였고, 배추는 수분분포와 대단히 유사한 경향을 보이고 있으며, 감자는 분포도로 보았을 때 수분에 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

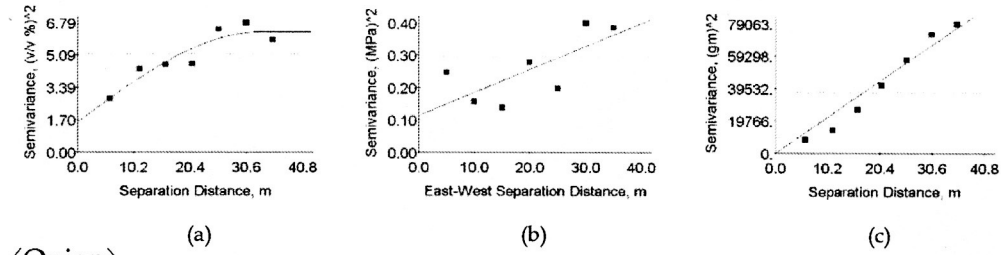
수분분포 (Fig. 3)와 작물수량분포 (Fig. 7)를 보면, 배추와 무는 수분이 높은 지역에서 수량도 높은 경향을 보였고, 감자는 반대로 수분이 높은 곳에서 수량이 낮게 나타나는 경향을 보였다. 따라서 배추와 무는 수분관리로 증수효과가 기대되고, 감자를 재배할 경우는 수분이 장기간 높은 수준으로 유지되지 않도록 하여야 안정적인 수량을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

적정 시료수 (필요 시료수) Table 4는 각 작물재배구의 토양수분, 토양경도, 작물수량에 대한 표준편차와 5% 유의수준에서 10%의 오차를 가지는 경우를 기준으로 계산한 시료수의 결정 결과이다. 제시한 조건을 만족시키기 위해서 500 m²의 면적에서 각 작물재배별로 필요한 시료의 수는 수분의 경우 8-40개, 경도 7-25개로 비교적 적은 수가 필요하나 수량에 필요한 시료수는 424-4678개로 많은 수가 요구되는 것으로 나타났다. 즉, 수분과 경도에 대한 조사의 수는 앞에서 공간변이 분석에서 이루어진 것이 적절한 것으

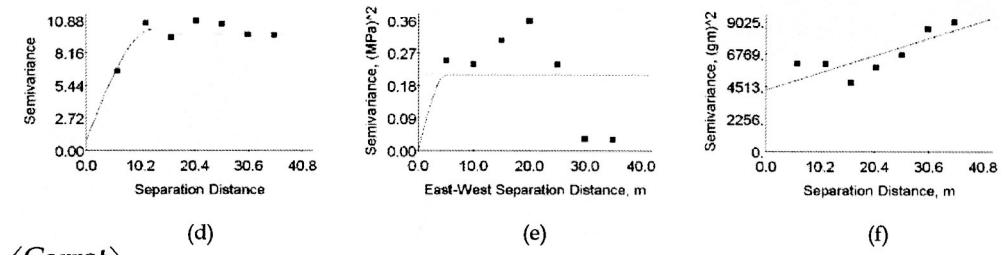
Table 3. Semivariogram and their estimated parameters.

Cultivated crops	Variables	Units	Models	Nugget, Co	Sill, Co+C	Range (A ₀ or 3A ₀), m	Proportion, C/(Co+C)	r ²
Potato	Moisture(0-10 cm)	v/v%	Spherical	1.580	6.308	33.33	0.750	0.863
	Penetration(0-20 cm)	MPa	Linear	0.113	0.362	35.00	0.688	0.504
	Yield	gm	Linear	10.000	76454.157	33.47	1.000	0.983
Onion	Moisture(0-10 cm)	v/v%	Spherical	0.910	10.150	12.52	0.910	0.833
	Penetration(0-20 cm)	MPa	Spherical	0.000	0.205	5.00	1.000	0.000
	Yield	gm	Linear	4260.000	8425.769	35.47	0.494	0.622
Carrot	Moisture(0-10 cm)	v/v%	Exponential	2.660	6.534	58.83	0.593	0.563
	Penetration(0-20 cm)	MPa	Spherical	0.000	0.151	10.06	1.000	0.065
	Yield	gm	Spherical	134.000	2057.000	7.98	0.953	0.042
Chinese cabbage	Moisture(0-10 cm)	v/v%	Spherical	1.150	14.640	5.90	0.921	0.000
	Penetration(0-20 cm)	MPa	Spherical	0.018	0.138	5.00	0.870	0.000
	Yield	gm	Spherical	8500.000	93200.000	5.90	0.909	0.000
Radish	Moisture(0-10 cm)	v/v%	Spherical	0.780	5.322	11.47	0.853	0.361
	Penetration(0-20 cm)	MPa	Spherical	0.001	0.801	12.98	0.999	0.610
	Yield	gm	Spherical	4700.000	101700.000	5.90	0.954	0.000

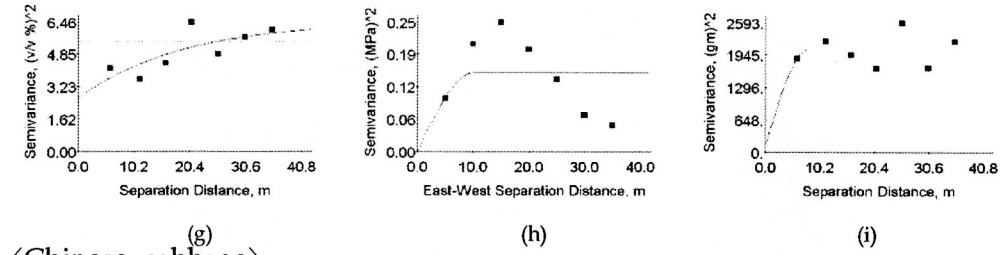
<Potato>



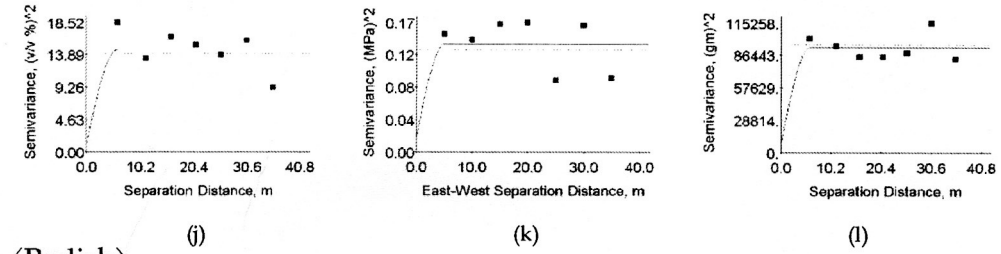
<Onion>



<Carrot>



<Chinese cabbage>



<Radish>

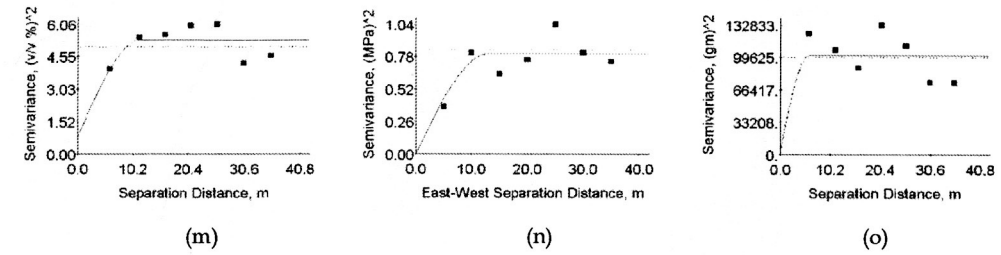


Fig. 6. Experimental semivariances (filled square dots) and the fitted semivariogram models (lines), for soil moisture contents (a, d, g, k, m), soil penetration resistances (b, e, h, k, n), cultivated crop yields (c, f, i, l, o).

로 나타났으나 수량의 조사량은 매우 부족한 것으로 나타나 일정 포장에 대한 수량의 대표성을 나타내기 위해서는 신중한 시료채취가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

시험 후 토양의 화학성은 유기물과 유효인산의 함량이 다소 높아졌으며, 다른 성분은 시험 전과 비교하

여 차이가 크지 않았다 (Table 5).

시험 결과로 보아 새로 밭을 조성하고자 할 때는 토양의 물리적 특성의 불균일에 의해서 발생하는 작물수량의 공간적 편차를 줄이기 위해 배수와 충분한 유효토심 및 균일한 경도의 분포 등을 고려하여 밭을 개간 및 조성하여야 할 것으로 생각된다. 또한 불균일

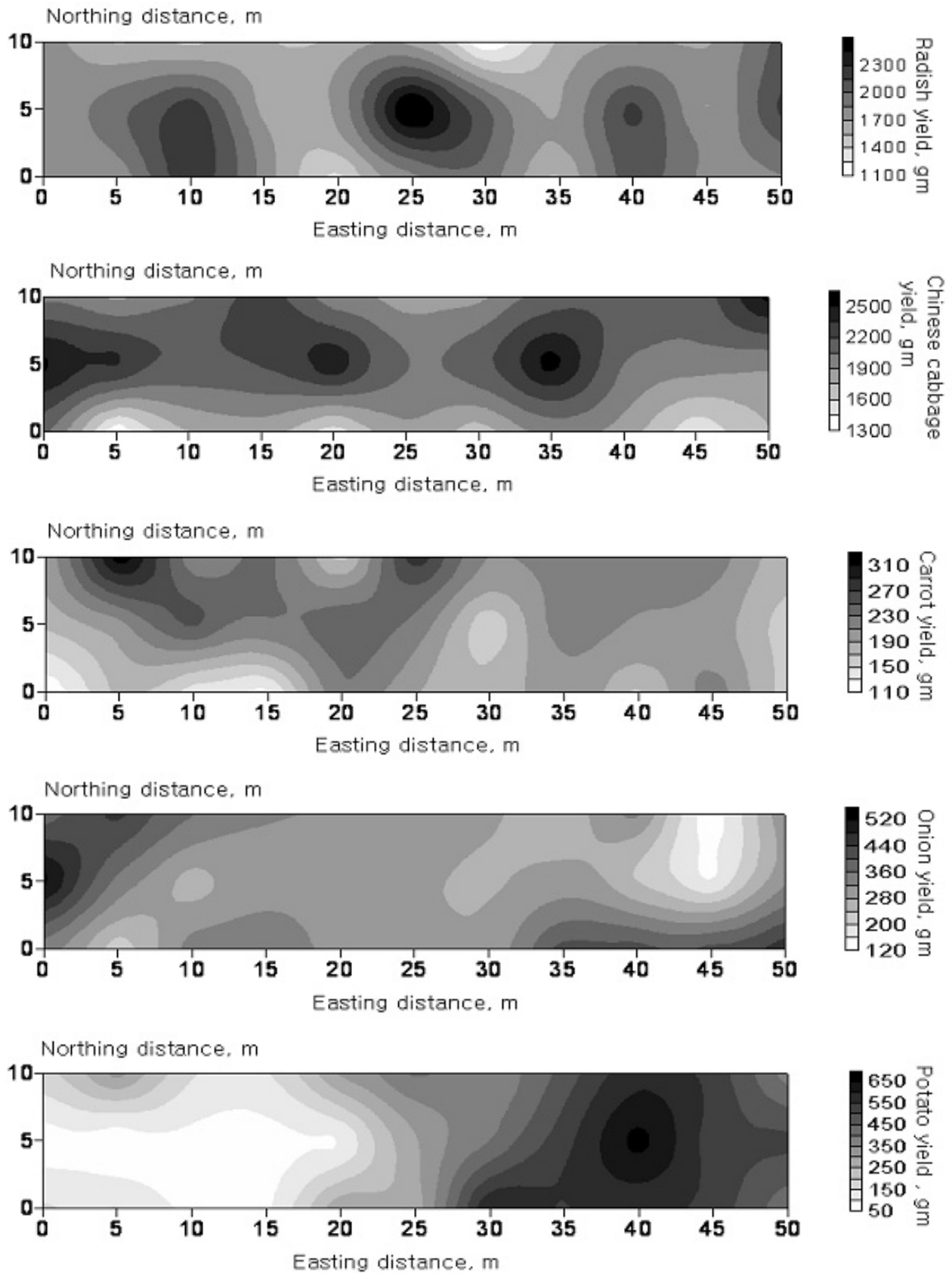


Fig. 7. Distribution maps of the crop yield for the five vegetables. The interpolated values were determined by kriging for each of the investigating points.

Table 4. The approximate number of samples required to estimate mean value of the soil moisture content (SMC), soil penetration resistance (SPR) and crop fresh weight (CFW) on the five cultivation plots in the saprolite piled upland.

Cultivation crops	Variables	Unit	Measured number, a	Estimated number, b [†]	a-b
Potato	SMC	v/v%	33	13	20
	SPR	MPa	11	11	0
	CFW	gm	33	4678	-4645
Onion	SMC	v/v%	33	27	6
	SPR	MPa	11	10	1
	CFW	gm	33	913	-880
Carrot	SMC	v/v%	33	8	25
	SPR	MPa	11	7	4
	CFW	gm	33	424	-391
Chinese cabbage	SMC	v/v%	33	40	-6
	SPR	MPa	11	5	6
	CFW	gm	33	1979	-1946
Radish	SMC	v/v%	33	13	20
	SPR	MPa	11	25	-14
	CFW	gm	33	2288	-2255

[†] Required number of soil samples for error with 10% at 0.05 significant level from the measured sample numbers of 33 for soil moisture content and cultivation crop yield, and 11 samples for soil penetration resistance in each cultivation plot.

Table 5. Chemical properties of the soil after harvest.

Crops	pH(1:5)	O.M.	NH ₄ -N	NO ₃ -N	Av. P ₂ O ₅	Exchangeable cations		
						Ca	Mg	K
		g kg ⁻¹	-----mg kg ⁻¹ -----		-----cmolc kg ⁻¹ -----			
Potato	5.5	33.7	14	15	193	2.6	1.7	0.95
Onion	5.1	35.5	16	19	133	1.6	1.1	0.47
Carrot	5.5	37.7	14	14	162	2.7	1.4	0.61
Chinese cabbage	5.4	35.0	16	22	199	2.5	1.2	0.68
Radish	5.7	29.5	15	19	221	3.0	1.5	0.79
Average	5.4	34.3	15	18	182	2.5	1.2	0.42

한 토양분포의 특성으로 인하여 안정적이고 균일한 작물수량의 확보에 어려움이 발생하지 않도록 관리하기 위해 본 논문에서 살펴본 밭토양의 물리적 특성의 공간변이성을 이용하여 작성하는 분포도를 활용한다면 보다 정밀한 포장관리를 하는데 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

적 요

고령지 경사지에서 모래성분이 많은 사양토 (석비레) 개간지의 토양특성에 대한 공간변이성과 분포도를 작성하여 공간적 변이를 살펴보고자 각각 10 m × 50 m의 면적을 가지는 5개의 포장에서 감자, 양파, 당근, 배추, 무를 재배하여 시험을 수행하였다. 각 포장의 조사지점수는 토양수분 33, 토양경도 11, 작물수량 33이었다.

Semivariance 분석 결과, 대부분의 모형은 spherical

모형을 따르고 있었으며, 각 모형에 대해 공간적으로 연속성이 인정되는 거리를 나타내는 범위 (range)는 감자재배구에서 33-35 m로 고르게 큰 값을 보였고, 배추재배지는 5-6 m로 모형에 대한 연속성이 낮은 것으로 나타났다. 수분과 경도 및 수량에 대한 변이계수는 14-59%로 다양하였고, 감자수량의 변이계수가 59%로 가장 높았으며, 무재배지의 수분은 14%로 낮았다. 표준편차 5% 유의수준에서 10%의 오차를 가지는 경우를 기준으로 적정시료의 수를 조사한 결과, 필요한 시료수는 수분 8-40개, 경도 7-25개, 수량 424-4,678개가 필요한 것으로 분석되었다.

Variogram과 분포도를 통해 수분과 경도 및 작물수량의 공간적 분포 및 변이성을 쉽게 파악할 수 있으며, 이를 활용한다면 보다 효율적이고 정밀한 토양관리가 가능할 것으로 판단된다.

인 용 문 헌

- Brady, N.C. 1980. The nature and properties of soils. 10th ed. p. 112. Macmillan Publishing Company.
- Brye, K.R., N.A. Salton, M. Mozaffari, M.C. Savin, R.J. Norman, and D.M. Miller. 2004. Short-term effects of land leveling on soil chemical properties and their relationships with microbial biomass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:924-934.
- Cho, J.H., and K.R. Kim. 1997. Effects of bulk density, volumetric water and gravel contents on hardness in prepared sandy loam. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 30:46-50.
- Eck, H.V. 1987. Characteristics of exposed subsoil - At exposure and 23 years later. *Agron. J.* 79:1067-1073.
- Franzuebbers, A.J. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil Tillage Res.* 66:197-205.
- Gupta, R.P. 1994. Physical rating of coarse textured soils to quantify production potential for sorghum. p. 306-311. In 15th World Congress of Soil Science, Vol. 5a. Symposia Transactions, July 10 ~ 16, 1994. Acapulco. Mexico.
- Haynes, R.J., and R. Naidu. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 51:123-137.
- Hur, B.K., I.S. Jo, K.B. Min, and K.T. Um. 1984. Representative physical and chemical properties of Korean soils by the results from detailed soil survey. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 17:330-336.
- Jo, I.S., B.K. Hyun, H.J. Cho, Y.S. Jang, and J.S. Shin. 1997. Effects of soil texture and bulk density on the least-limiting water range. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 30:51-55.
- Jo, I.S., L.Y. Kim, D.U. Choi, J.N. Im, and K.T. Um. 1983. The effects of soil physical properties on root distribution of barley. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 16:126-130.
- Journel, A.G. 1996. Geostatistics: Tools for advanced spatial modeling in GIS. p. 39-55. In D. L. Corwin and K. Loague(ed.) Application of GIS to modeling of non-point source pollutants in the Vadose Zone. SSSA Spec. Pub. 48, Madison, WI.
- Kim, L.Y., J.N. Im, and K.T. Um. 1981. Differences in soil productivities between the cut site and fill site in a newly reclaimed land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 14:190-194.
- Kim, P.J., D.K. Lee, and D.Y. Chung. 1997a. Effects of soil bulk density on saturated hydraulic conductivity and solute elution patterns. *J. Korea Soc. Soil Sci. Fert.* 30:234-241.
- Kim, P.J., D.K. Lee, and D.Y. Chung. 1997b. Vertical distribution of bulk density and salts in a plastic film house soil. *J. Korea Soc. Soil Sci. Fert.* 30:226-233.
- Lee, C.S., G.J. Lee, K.Y. Shin, J.H. Ahn, J.T. Lee, and B.K. Hur. 2002. Effect of application added phosphorus and potassium for potato and Chinese cabbage in mounded highland soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 35:372-380.
- Miller, R.W., and D.T. Gardiner. 2001. Soils and our environment. 9th ed. p. 64-68. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey. USA.
- Mohammed, S.L., L. Louise, A.M. Hank, C.S. Debra, B. Louis, and R. Mario. 2006. Spatial variability of substrate water content and growth of white spruce seedlings. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 70:108-120.
- Myers, J.C. 1986. Calculating of kriging error for non-rectangular areas and global sampling patterns. Proceedings of the Northwest Mining Association Convention. Spokane, WA.
- Myers, J.C. 1997. Geostatistical error management: quantifying uncertainty for environmental sampling and mapping. p. 263-305. Van Nostrand Reinhold, USA.
- Nathan, W.H., B. Liu, C.W. Boast, P.C.C. Rao, E.J. Klavivko, and D.P. Franzmeier. 2004. Spatial variability and measurement scale of infiltration rate on an agricultural landscape. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 68:1818-1826.
- NIAST. 1981. The research report-Dept. of Soil Chemistry. National Institute of Agricultural Science and Technology p.273-278.
- Oh, Y.T., D.S. Oh, K.C. Song, J.S. Shin, and J.N. Im. 1998. Application of dielectric sensor for soil moisture measurement. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 31:85-94.
- Park, C.S., J.J. Kim, and S.J. Cho. 1984a. Spatial variability for particle size distribution of two soils. II. fitting variogram models and kriging. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 17:319-324.
- Park, C.S., J.J. Kim, and S.J. Cho. 1984b. Analysis of spatial variability for infiltration rate of field soils. II. Kriging. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 17:18-23.
- Park, C.S., J.J. Kim, and S.J. Cho. 1984c. Analysis of spatial variability for infiltration rate of field soils. I. Variogram. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 16:305-310.
- Park, M.E. 1987. Spatial variation analysis of soil characteristics and crop growth. Ph. D. Thesis, Seoul national university, Seoul, Korea.
- 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.* 22:163-172.
- Robbins, C.W., B.E. Mackey, and L.L. Freeborn. 1997. Improving exposed subsoils with fertilizers and crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1221-1225.
- Robbins, C.W., B.E. Mackey, and L.L. Freeborn. 1999. Phosphorus forms and extractability from three sources in a recently exposed calcareous subsoil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1717-1724.
- Ryu, K.S., and K.C. Eom. 1986. The effect of irrigation on the growth of horticultural crops in a sandy loam. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 19:14-20.
- Shin, C.S., G.S. Rhee, J.D. Kim, and Y.H. Shin. 1974. Status of soils in reclaimed land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 7:137-140.
- Taylor, H.M., G.M. Roberson, and J.J. Parker. 1966. Soil strength and root penetration relations for medium to coarse-texture soil materials. *Soil Sci.* 102:18-22.
- Trangmar, B.B., R.S. Yost, and G. Uehara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.* 38:45-94.
- Vieira, S.R., J.L. Hatfield, D.R. Nielson, and J.W. Biggar. 1983. Geostatistical theory and application to variability of some

- agronomical properties. *Hilgardia* 51:1-75.
- Watts, C.W., W.R. Whalley, D.J. Longstaff, R.P. White, P.C. Brooke, and A.P. Whitmore. 2001. Aggregation of a soil with different cropping histories following the addition of organic materials. *Soil Use Manage.* 17:263-268.
- Whitney, R.S., R. Gardner, and D.W. Robertson. 1950. The effectiveness of manure and commercial fertilizer in restoring the productivity of subsoils exposed by leveling. *Agron. J.* 42:239-245.
- Yu. I.H. 2003. Mapping of soil salinity measured by electromagnetic inductance technique and geostatistical analysis for the reclaimed tidal lands. M. S. Thesis, Kangwon National University, Chuncheon, Korea.