

경사지 배수불량 논에서 배수개선 효과의 지구통계적 기법을 이용한 평가

정기열* · 윤을수 · 박기도¹ · 박창영

농촌진흥청 국립식량과학원 기능성작물부, ¹농촌진흥청 녹색미래전략팀

Evaluation of Drainage Improvement Effect Using Geostatistical Analysis in Poorly Drained Sloping Paddy Soil

Ki-Yuol Jung*, Eul-Soo Yun, Ki-Do Park¹, and Chang-Young Park

Functional Cereal Crop Research Division, NICS, RDA, Milyang, 627-830, Republic of Korea

¹Department of Planning & Coordination Division, RDA, Suwon, 441-707, Republic of Korea

The lower portion of sloping paddy fields normally contains excessive moisture and the higher water table caused by the inflow of ground water from the upper part of the field resulting in non-uniform water content distribution. Four drainage methods namely Open Ditch, Vinyl Barrier, Pipe Drainage and Tube Bundle for multiple land use were installed within 1-m position from the lower edge of the upper embankment of sloping alluvial paddy fields. Knowledge of the spatial variability of soil water properties is of primary importance for management of agricultural lands. This study was conducted to evaluate the effect of drainage in the soil on spatial variability of soil water content using the geostatistical analysis. The soil water content was collected by a TDR (Time Domain Reflectometry) sensor after the installation of subsurface drainage on regular square grid of 80 m at 20 m paddy field located at Oesan-ri, Buk-myeon, Changwon-si in alluvial sloping paddy fields (35°22' N, 128°35'). In order to obtain the most accurate field information, the sampling grid was divided 3 m by 3 m unit mesh by four drainage types. The results showed that spatial variance of soil water content by subsurface drainage was reduced, though yield of soybean showed the same trends. Value of "sill" of soil water content with semivariogram was 9.7 in Pipe Drainage, 86.2 in Open Ditch, and 66.8 in Vinyl Barrier and 15.7 in Tube Bundle.

Key words: Geostatistics, Spatial variability, Semi-variance, Subsurface drainage, Kriging

서 언

경사지에 분포한 논 (지형기울기=1/50 이상)은 대부분 산으로 둘러싸여 있어 여름철 강우기의 지하수위 상승과 인근 농경지로부터의 침출수가 스며 나와 산 측은 연중 과습하고 논 독 측은 상대적으로 수분이 낮아 필지 내 수분상태가 불균일하고 수온 및 지온의 저하, 유해 환원물질 생성 등으로 발작물 생육에 치명적인 피해를 주기 쉽다 (한국농어촌공사, 2004).

배수불량지에 대한 지표배수에 의한 토양특성의 변화와 배수개선 효과에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나 (Wesseling and van Wijk, 1957; Reeve and Fausey, 1974; Abdel Dayem et al. 1987), 배수개선에 따른 공간적 변이분석을 통해 배수개선의 효과에 대한 분석은

아직 많이 이루어지지 않고 있다. Bouwer and Jackson (1974), Freeze (1980), Milly and Eagleson (1987) 등은 농경지에서 토양수분의 배수개선 효과를 분석하기 위해 공간분석 방법을 처음 적용하였고, Mahmoud and Yomota (1998)은 이집트 나일강유역의 배수불량농경지에서 암거배수 처리 후 지하수위, 염농도, 포화수리전도도 등 토양수분 특성의 배수개선 효과를 해석하기 위해 공분산 (covariance variogram)과 반차의 분산 (semi-variogram) 공간변이 분석법을 상호비교 하였다.

우리나라에서는 지구통계학은 주로 정밀농업을 연구하는 학자들을 중심으로 적용되어왔고 주로 대단위 필지 내에서 토양의 이화학적 특성, 작물생육상황, 수량 등의 공간적 변이성을 분석하는데 이용되어 왔으며 (Chung et al. 2000), 아직까지 지구통계학을 농업적으로 이용한 연구는 미미한 수준이라 할 수 있다.

본 연구는 경사지 배수불량 논에서 발작물 재배확대 및 생산성향상을 위한 합리적인 배수개선 기술을 개발하

접수 : 2010. 11. 15 수리 : 2010. 12. 15

*연락처 : Phone: +82553501263

E-mail: jungky@rda.go.kr

기 위해 논둑 바로 밑에 1열로 명거 (겉도랑) 배수, 비닐 차단막, 암거 (속도랑) 배수, 관다발 등 4개의 배수시설을 설치후 지구통계학적 방법을 이용하여 배수개선 방법에 따른 배수개선 효과를 비교 분석하였다.

재료 및 방법

공시토양의 특성 배수개선 시험이 수행된 토양은 경남 창원시 북면 외산리에 소재한 경사 7~15%의 곡간 상부에 위치한 토양으로 화강암에서 유래된 산성암 층적층을 모재로 이루어진 토양으로 미 농무성 (USDA)의 새로운 분류방법에 의하면 식양계의 회색토로 지산토 (fine loamy, mixed, mesic family of Fluvaquentic Endoaquept)에 해당된다. 주변이 산으로 둘러싸여 있어 연중 농경지 논 둑 아래에서 용출수가 유입되어 산 측은 연중 과습하고 논 둑 측은 상대적으로 수분이 낮아 필지 내 수분상태가 불균일한 농경지 이었다. 표토 (Ap층)는 암

회갈색 (2.5Y 4/2)의 양토이고 심토1 (Bg층)에는 회색 (5Y 5/1)의 식양토로 심토2 (BCg층)은 회색 (5Y 5/1)의 사양토로 이루어진 토양이다 (Table 1).

배수개선 방법 시험구 배치는 배수가 “매우불량”인 논 2개 필지, 배수등급이 “약간불량”인 논 2개 필지로 선정하였다 (Fig. 1). 배수개선 방법은 명거배수 (Open Ditch), 비닐차단막 (Vinyl Barrier), 암거배수 (Pipe Drainage), 그리고 관다발 (Tube Dundle) 등 총 4개로 선정하여 배수시설 장변 방향으로 논둑 바로 밑에 1열로 각각 설치하였다. 명거배수 (겉도랑 배수)는 폭 30 cm에 깊이 30 cm의 지표 배수로를 설치하였고, 비닐차단막은 논둑 기저부에 60~90 cm 깊이로 터파기를 한 다음 용출수 유입을 차단하기 위해 논 면의 기벽에 $\varnothing 0.3$ mm 두께의 비닐을 매설 후 흙으로 뒤 매움하여 설치하였다. 관다발 배수는 대나무로 30 cm직경의 다발로 묶어 60 cm~90 cm 깊이에 매설한 후 흙으로 뒤 매움 하였으며 암거배

Table 1. Physical properties of the soil research field before experiment.

Horizon	Depth cm	Bulk density Mg m ⁻³	Three phases			Porosity %	Textural Class
			Solid	Water	Air		
Ap1	0-10	1.18	44.5	40.2	15.3	55.5	loam
Ap2	10-20	1.55	58.6	25.9	15.5	41.4	loam
Ag	20-24	1.62	61.2	24.1	14.7	38.8	loam
Bg	24-35	1.60	60.3	22.3	17.4	39.7	Sandy loam
BCg	35+	1.60	60.4	25.0	14.6	39.6	Sandy loam

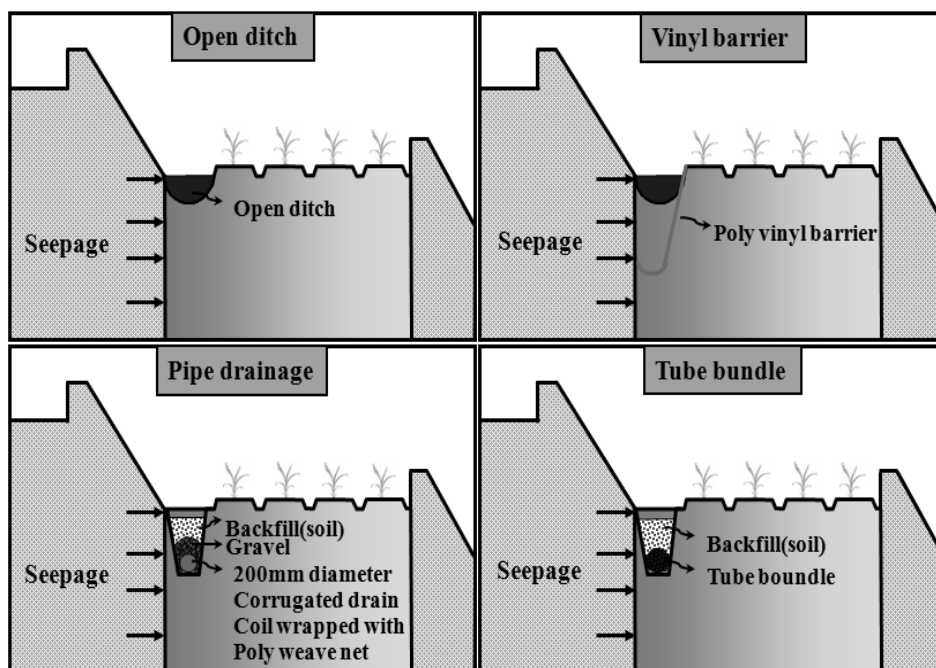


Fig. 1. Diagram of various drainage systems.

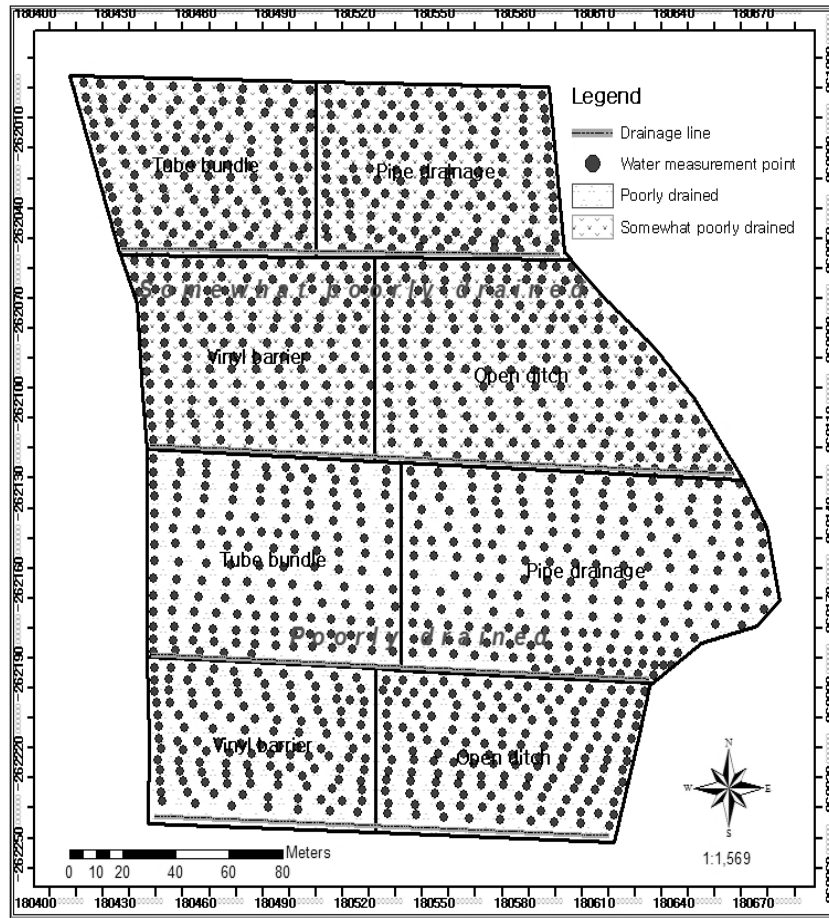


Fig. 2. Map of the measuring point of surface water content with TDR.

수 (속도랑 배수)는 폭 50 cm 깊이는 상류부 60 cm, 하류부 90 cm로 굴삭하고 20 cm 직경의 유공흡수관을 매설하고 흡수거는 상류로부터 침출수를 최대한 흡수하기 위해 소수재 (자갈층)를 논 면의 15~20 cm 깊이까지 충전하였다.

자료 취득 배수방법별 배수개선 효과의 공간적 변이분석을 위해 Fig. 2에서와 같이 포장 내에서 3 m × 3 m 크기로 격자로 나눈 후 고주파 측정방식의 TDR (Time Domain Reflectometry)를 이용하여 근권부 (깊이 20 cm)의 토양의 수분 함량을 약 1,265 지점에 대하여 측정하였으며 GPS 장비를 이용하여 조사지점에 대한 위치 정보를 조사하였다.

반베리오그램 모델링 (Semi-variogram modeling) 베리오그램은 일정거리만큼 떨어져 있는 자료들이 평균적으로 얼마나 다른지를 나타내는 정량적 지표라 할 수 있으며 베리오그램의 반에 해당하는 값을 반 베리오그램 (semi-variogram)이라하며 (손학기, 2004), 분리거리 h 만큼 떨어진 자료의 개수가 n 개일 때, 반베리오그램을 구하기 위해서는 Journel and Huijbregts (1978)이 제안한 산출

수식 (1)을 이용하였다.

$$r(h)s = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{z(x_i) - z(x_1+h)\} \quad (\text{수식-1})$$

여기서, $r(h)$: 반 베리오그램

$z(x_i)$ = 임의의 지점 x에 있는 자료의 값

$z(x_i) + h$: $z(x_i)$ 에서 h만큼 떨어져 있는 지점의 자료값

h : 자료사이의 거리

$N(h)$: 서로 다른 원소의 개수자료의 수

베리오그램의 주요 인자로는 Fig. 3과 같이 문턱값 (sill), 상관거리 (separation distance) 너깃 (nugget) 등이 있다. 분리거리가 증가하여 일정거리가 되면 자료들 간의 상관성이 없는 일정한 상태의 베리오그램 값이 나타나는 데, 자료값들이 아무런 관계를 나타내지 않게 되어 반베리오그램이 일정한 값을 가질 때의 거리를 구간거리 또는 상관거리라 하고 이때 자료값을 문턱값 (sill)이라고 한다 (Kevin et al. 2003; 정찬덕, 2005; 최선영, 2004). 즉 문턱값은 자료의 분산을 나타낸다 (Johnston et al.

2001).

반베리오그램의 모델은 문턱값의 존재 유무에 따라 여러 가지 모델로 구분되는데 일반적으로 사용되는 이론적인 차의 분산 (variogram)에는 선형모형(Linear model), 구형모형 (Spherical model), 지수모형 (Exponential model), 가우시안 모형 (Gaussian model) 등이 있으며, 이중 자료의 공간적 상호관계를 가장 잘 묘사하는 모델을 선택하여야 한다고 하였다 (Journel and Huijbregts, 1978; 이희정, 2008; 최선영, 2004; 이효재, 2009).

본 연구에 사용한 반베리오그램 모델은 지금까지 개발되어진 여러 가지 모델 중 자료의 공간적 상호관계를 잘 묘사하는 모델식을 이용하여 공간분석법인 ArcGIS 9.2 Geostatistical analysis와 GS⁺ Version 5.1 (Gamma Design Software)을 이용하여 변이를 분석하고 배수개선 효과를 평가하였다.

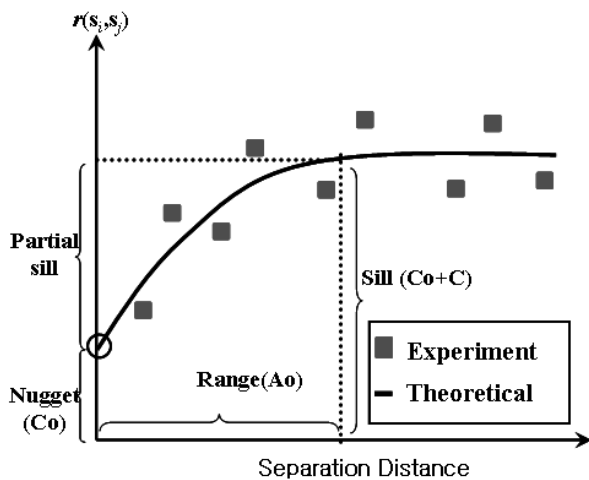


Fig. 3. Semivariogram schematic (Journel and Huijbregts, 1978).

결과 및 고찰

탐색적 공간자료 분석 (Exploratory spatial data analysis)

배수방법에 따른 토양수분함량의 기술통계량을 분석한 결과를 Table 2에 정리하였다. 그 결과, 평균 수분함량은 배수 약간불량지가 배수 매우불량지에 비해 낮았다. 배수 방법별로 수분함량을 비교해 보면 명거배수 (36.17 mm), 비닐차단막 (32.87 mm), 관다발 (28.71 mm), 암거배수 (23.21 mm) 순으로 낮은 경향을 보였다. 또한 토양수분의 변이계수를 비교해 보면 배수 약간불량지에 비해 매우불량지에서 배수방법별 변이계수의 차이가 뚜렷하였으며 (Table 2), 암거배수 처리구는 변이계수가 13.0%로 명거배수 (23.4%), 비닐차단막 (22.2%), 관다발 (15.1%)에 비해 포장 내에서 수분함량이 균일한 것으로 나타났다.

주어진 토양 수분함량의 공간자료의 전체적인 분포특성을 파악하기 위해 계급간 누적분포도 (histogram)을 작성하였다 (Fig 4.). 왜도 (skewness)와 첨도 (kurtosis)는 각각 뾰족한 정도와 기울어진 정도를 나타내는 값으로 첨도의 값이 1이고, 왜도가 0이면 표준정규분포 형태가 되고 첨도의 값이 커지면 표준정규분포보다 더 뾰족한 형태, 즉 평균에서 상당히 높은 형태가 된다고 알려져 있다. 즉 왜도 (skewness)가 0보다 크면 오른쪽으로 기울어졌다는 것이고, 0 보다 작으면 왼쪽으로 기울어져 있다는 것을 의미한다 (최종근, 2007). 명거배수와 비닐차단막구에서는 각각 왜도값이 -0.55 와 -0.42 로 평균값 (mean)이 중앙값 (median) 보다 작은 비대칭분포 (skewed distribution)인 양성왜도 (negatively skewed)의 특성을 보이는 반면 암거배수구에서는 왜도값이 0.04 로 평균값 (mean)이 중앙값 (median)이 보다 약간 큰 양의 부호를 갖는 음성왜도 (positively skewed)를 보이거나 거의 정규화 분포 특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 배수개선방법에서는 암거배수방법이 가장 효율성

Table 2. General statistics for surface water content by drainage methods in experiment area.

Drainage	Mean	Min	Max	Std Dev.	CV	Skew [†]	Kut [‡]
Poorly drained							
Open ditch	36.17	15.9	49.5	8.48	23.4	-0.55	-0.90
Vinyl barrier	32.87	13.2	46.8	7.29	22.2	-0.42	-0.34
Pipe Drainage	23.21	14.8	30.7	3.03	13.0	0.04	-0.34
Tube bundle	28.71	15.7	35.1	4.33	15.1	-0.10	-0.82
Somewhat poorly drained							
Open ditch	27.21	10.7	39.3	5.43	19.9	0.18	-0.27
Vinyl barrier	23.99	11.2	39.5	5.58	23.2	0.29	-0.21
Pipe Drainage	15.26	10.9	21.2	2.49	16.3	-0.04	-0.43
Tube bundle	16.83	10.7	23.2	2.79	16.6	0.07	-0.80

[†]Skew : Skewness, [‡]Kut : Kurtosis.

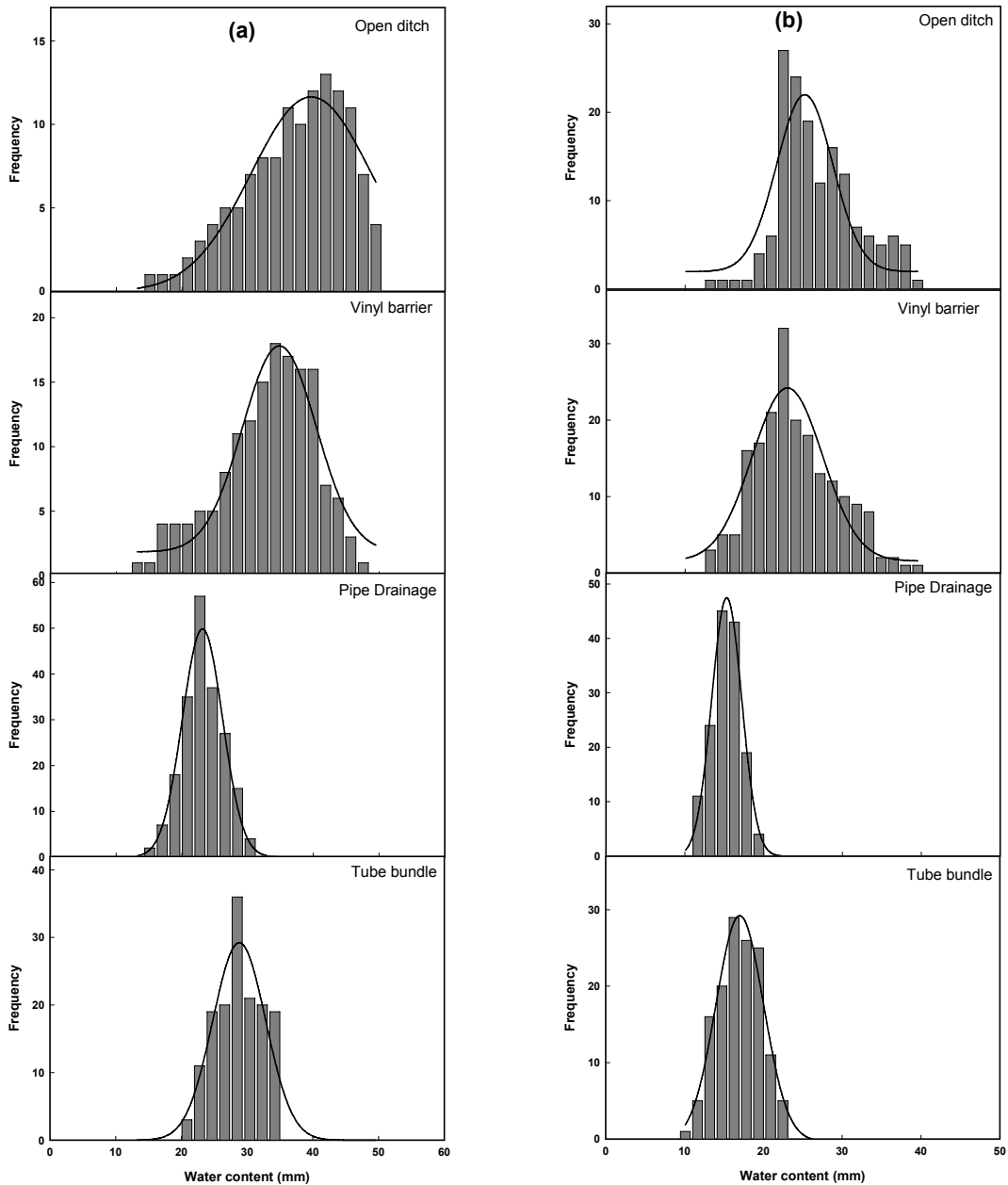


Fig. 4. Histogram for surface water content by drainage methods. (a) poorly drained field, (b) somewhat poorly drained field.

이 높은 인자임을 지시하는 것이다 (Fig. 4). 또한 배수 매우불량지에 비해 배수 약간불량지에서 왜도값이 낮은 경향을 보였으며 토양의 배수등급에 따라서도 비슷한 결과를 보였다. 배수방법별 침도값은 명거배수구에서의 침도값이 -0.90 으로 정규분포보다 덜 뾰족하고 분산이 커 퍼짐분포 (platykurtic) 보이는 반면 암거배수구에서는 -0.34 로 작은 분산을 보이며 평균을 중심으로 밀집분포 (leptokurtic) 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이처럼 명거배수 처리구에서의 침도값이 낮은 것은 수분함량이 넓은 범위에 분포하고 있어 표준편차가 크다는 것을 의미하며 암거배수에서 침도값이 낮은 것은 표준편차가 아주

작아 거의 대부분의 수분함량이 평균 근처에 밀집되어 있다는 것을 확인할 수 있었다.

세미베리오그램 (Semivariogram) 일반적으로 베리오그램은 각 표본들 간의 분리거리에 따른 분산을 나타낸 것으로 추정이 필요한 지점에서 거리가 가까운 표본 위치 지점까지 거리에 포함된 표본들 간의 자기 상관관계를 나타내는 것으로 구형모델 (spherical model), 지수 모델 (exponential model), 가우시안모델 (gaussian model)을 이용하였다 (최종근, 2007). 베리오그램에서 sill과 range를 가장 잘 표현한다고 판단되는 active lag와 lag in-

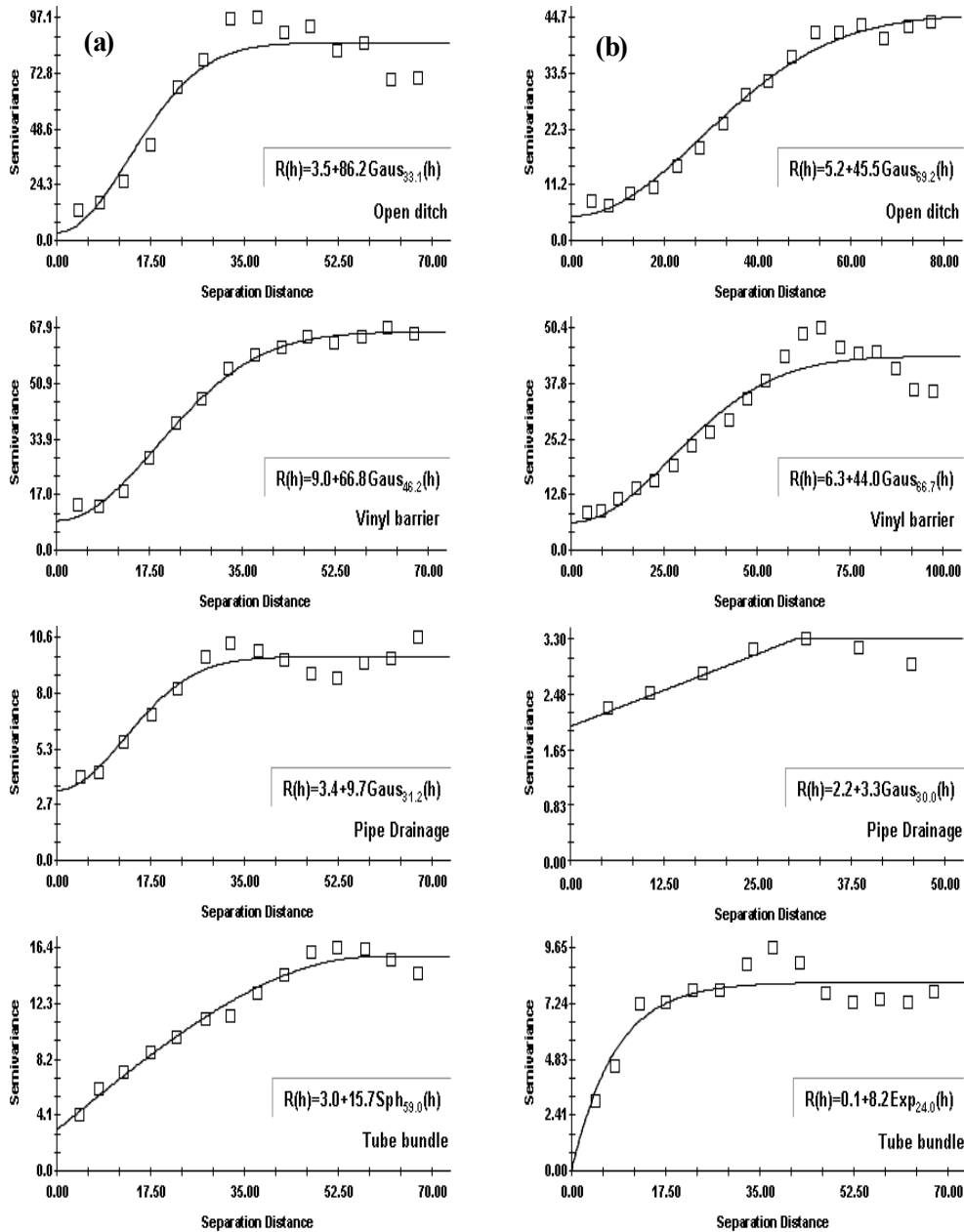


Fig. 5. Isotropic semivariogram for surface water content by drainage methods in experiment area: (a) poorly drained field; (b) somewhat poorly drained field.

terval를 선택하였다. 배수방법별 토양수분 함량에 대한 세미베리오그램으로 분석한 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

문턱값을 기준으로 보면, 배수등급 두가지 지역 모두 암거, 관다발, 명거, 비닐벽 처리 순으로 배수개선 효과가 우수하였다. 상관거리 또한 암거와 관다발 처리에서 대체적으로 낮게 나타나 수분함량 균일도가 높은 것으로 판단되었다. 배수등급별 문턱값 (sill)은 Table 3에서와 같이 배수가 약간불량지에 비해 매우불량지에서 배수개선 방법별 차이가 뚜렷하였다. 특히, 배수 매우불량지의 암거배수 처리구에서 문턱값은 9.7로 명거배수 (86.2), 비닐차단막 (66.8), 관다발 (15.7)에 비해 낮아 변이가 적

고 균일성이 높아 암거배수에 의한 배수개선 효과가 큰 것으로 나타났다. 또한 상관거리는 암거배수 처리구에서 31.2 m으로 명거배수 (33.1 m), 비닐차단막 (46.2 m), 관다발 (59.0 m)에 비해 낮게 나타났다. 이러한 결과는 배수 약간 불량 지역에서도 유사한 경향으로 나타났다.

기술 통계를 통하여 배수 효과를 평균이 낮은 것이 우수하고, 배수 균일도는 변이계수 (또는 표준편차)가 낮은 것으로 평가하였다. 공간통계 분석을 통하여 이러한 배수 균일도가 거리에 따라 어떻게 분포하는지를 평가하여 문턱값이 낮은 것이 배수 균일도가 우수한 것으로 평가하였으며 유사한 문턱값을 가진 처리에서는 상관거리

Table 3. Isotropic semivariogram parameter for surface water content by drainage methods in experiment area.

Drainage	Model	Active lag m	Lag interval m	Nugget (Co)	Sill (Co+C)	Effective range m	R ²
Poorly drained							
Open ditch	Gaussian	70	5	3.5	86.2	33.1	0.90
Vinyl barrier	Gaussian	70	5	9.0	66.8	46.2	0.99
Pipe Drainage	Gaussian	70	5	3.4	9.7	31.2	0.93
Tube bundle	Spherical	70	5	3.0	15.7	59.0	0.96
Somewhat poorly drained							
Open ditch	Gaussian	80	5	5.2	45.5	69.2	0.99
Vinyl barrier	Guassian	100	5	6.3	44.0	66.7	0.92
Pipe Drainage	Gaussian	50	5	2.2	3.3	34.6	0.73
Tube bundle	Exponential	70	5	0.1	8.2	24.0	0.80

가 작은 처리의 배수 균일도가 우수한 것으로 평가할 수 있었다. 이러한 평가는 배수뿐 아니라 농경지의 토양 비옥도, 벼 생육, 수확량의 공간분포 평가에도 사용되고 있다 (Chung et al., 2000).

요 약

경사지 논토양에서 밭작물 재배확대를 위한 합리적인 배수개선 방법을 개발하기 위하여 “배수불량”인 경사지 논토양 (경사 7-15%, 지산통)을 대상으로 배수조건에 따라 “매우불량”인 논 2개 필지, “약간불량”인 논 2개 필지의 논둑아래 기저부에 1열로 명거 (겉도랑 배수), 비닐차단막, 암거 (속도랑 배수), 관다발 등 네 가지 종류의 배수시설을 설치하여 공간상의 위치에 대한 상관관계를 분석하는 지구통계적 방법 (Geostatistical methods)를 이용하여 저비용의 실용적 배수방법을 개발하기 위해 배수개선 방법에 따른 배수개선 효과를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

TDR 이용하여 측정된 배수방법별 토양수분함량의 기술통계량을 분석한 결과 배수개선 방법별 평균수분함량은 명거배수 (36.17 mm), 비닐차단막 (32.87 mm), 관다발 (28.71 mm), 암거배수 (23.21 mm) 순으로 낮은 경향을 보였으며, 또한 암거배수 처리구에서의 변이계수가 13.0%로 명거배수 (23.4%), 비닐차단막 (22.2%), 관다발 (15.1%)에 비해 포장 내에서 수분함량이 균일한 것으로 나타났다.

토양수분함량의 이론적 반베리오그램을 분석한 결과 배수등급별 문턱값 (sill)은 배수가 약간불량지에 비해 매우불량지에서 배수개선 방법별 차이가 뚜렷하였으며, 특히 배수 매우불량지의 암거배수 처리구에서 문턱값은 9.7로 명거배수 (86.2), 비닐차단막 (66.8), 관다발 (15.7)에 비해 낮아 변이가 적고 균일성이 높아 암거배수에 의한 배수개선 효과가 큰 것으로 나타났다.

따라서 “배수불량”인 경사지 논에서는 논둑 밑 1열의 암거배수시설을 설치로 논에서 밭작물의 안정적인 생산과 농지자원의 이용전환 즉 논을 밭으로 이용해야 하는 범용농지 기반조성에 조성을 위한 저비용의 실용적인 배수개선 방법개발에 기여할 것으로 본다.

인 용 문 헌

- Abdel-Dayem, M.S., M.A. Abu-Sinna, M.H. Amer, and J. Deelstra. 1987. Subsurface drainage in irrigated lands and its effect on soil and crops. Proc. 5th National Drainage Symposium, 14-15 December, ASAE, Chicago, pp. 168-177.
- Bouwer, H. and R.D. Jackson. 1974. Determining soil properties. In: van Schilfgaarde, J. (Ed.), Drainage for Agriculture. Madison, WI. pp. 611-666.
- 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.
- Freeze, R.A. 1980. A stochastic-conceptual analysis of rainfall-runoff processes on a hillslope. Water Resour. Res. 16:391-408.
- Johnston, K., J.M. Ver Hoef, K. Krivoruchko, and N. Lucas. 2001. ArcGISTM Geostatistical Analyst extension User's Guide. ETRI.
- Journel, A.G. and C.J. Huijbregts. 1978. Mining Geostatistics. Academic Press, London, pp. 600.
- Kevin Johnston, Jay M. Konstantin Krivoruchko, Ver Hoef, and Neil Lucas. 2003. Using ArcGIS Geostatistical Analyst, ESRI ArcGIS 9 tutorial manual. pp. 306.
- Mahmoud, M. and A. Yomota. 1998. Use of a covariance variogram to investigate influence of subsurface drainage

- on spatial variability of soil-water properties. *Agricultural Water Management* 37:1-9.
- Milly P.C.D. and P.S. Eagleson. 1987. Effects of spatial variability on annual average water balance. *Water Resour. Res.* 23:2135-2143.
- Reeve, R.C. and N.R. Fausey. 1974. Drainage and timeliness of farming operations. In: van Schilfgaarde, J. (Ed.), *Drainage for Agriculture*. Madison, WI, pp. 55-666.
- Wesseling, J. and W.R. van Wijk. 1957. Soil physical conditions in relation to drain depth. In: Luthin, J.N. (Ed.), *Drainage of Agricultural Lands*. Madison, WI, pp. 461-504.
- 손학기. 2004. 공간정보 모델링 세미나: 베리오그램, 크리깅.
- 이효재. 2009. GIS를 이용한 보성지역 지하수의 지구화학적 특성예측. 전남대학교 박사학위논문.
- 이희정. 2008. 베리오그램 모델에 따른 크리깅 보간법의 정확성. 영남대학교 석사학위 논문.
- 정찬덕. 2005. GIS를 이용한 무안군 무청지구 지하수위 수질변화 연구. 전남대학교 석사학위 논문.
- 최종근. 2007. 지구통계학. 시그마프레스.
- 최선영. 2004. GIS의 통계적 공간 분석을 이용한 해수침투 분포양상 파악. 전남대학교 석사학위 논문.
- 한국농어촌공사. 2004. 농업생산기반정비사업계획설계기준 (배수편).