

# 수도포장에서의 벼 수확량, 엽록소 함량, 토양속성 공간변이

## Spatial Variability of Yield, Chlorophyll Content, and Soil Properties in a Rice Paddy Field

정선옥*	성제훈*	현병근**	박우풍*
정희원	정희원		정희원
S.O.Chung	J.H.Sung	B.K.Hyun	W.P.Park

### 1. 서론

위치특성에 맞는 작물관리(site-specific crop management)를 의미하는 정밀농업은 비교적 대규모 경지에 적합한 것으로 인식되고 있으며 실제로 북미, 유럽, 오스트레일리아 등에서는 잘 정립되어 있다. 그러나, 최근에는 1)경작지는 좁은데 지하급수적으로 불어나는 인구의 식량을 해결하기 위하여 1960년대부터 추진된 증수일변도의 정책으로 농업 화학제를 무차별적으로 투입하여 생태계파괴, 지하수 오염 등의 심각한 사회문제를 일으키고 있고, 2) 이는 환경친화적인 농업을 추진해야 한다는 국제적인 요구가 되고 있고, 3) 국경없는 무한 경쟁체제에 농산물 경쟁력을 제고해야 한다는 압박이 있으며, 4) 급격한 산업화로 농촌인구가 대량으로 도시로 유입되어 현재 농촌에는 60세 이상의 노인들이 대부분이라는 문제들 때문이다. 이러한, 우리나라 농업의 특수성은 북미, 유럽, 오스트레일리아 지역의 농업보다도 더욱 변화를 요구하고 있다(Ancha Srinivasan, 1998).

정밀농업에서는 포장내 데이터 획득, 수집된 데이터 분석과 최적 의사결정, 변량적 농자재 투입, 그리고 평가의 과정이 순환고리를 이루며, 작물 수확량, 생육상태, 토양의 속성 등이 중요한 자료들이며 통합적으로 사용된다. 전형적인 우리나라 수도포장에서 이러한 속성들의 변이를 이해하는 것은 관리단위를 결정하고 요인들간의 상호관계를 분석하여 포장관리 전략을 수립하는 첫걸음이 된다. 이러한 이유로 정밀농업이 “변이의 관리”라고 불리우기도 한다.

변이분석에는 일반적으로 국부변수의 원리(the theory of regionalized variables)에 기초를 둔 지리통계(geo-statistics) 기법이 사용된다. 분석 결과는 샘플링 주파수와 양, 샘플링 간격과 정밀도, 분석 S/W에서 파라미터 설정등에 따라 매우 달라지므로 분석하는 사람의 경험과 해당 포장에 대한 지식이 요구된다(Webster, R. and M.A. Oliver., 1990). 또한, 반분산도(semi-variogram)을 이해하고 모델을 선정하는 것이 변이의 이해와 관리전략 수립에 중요하다(Bakhsh, A. et al. 2000., Hergert G.W., et al. 1995., Oliver M.A. 1999.)

본 논문의 목적은, 우리나라 표준 수도포장에서의 벼 수확량, SPAD 값, 토양속성의 공간변이를 이해하는 것이다.

\* 농촌진흥청 농업기계화연구소 생물생산기계과

\*\* 농촌진흥청 농업기계화연구소 토양관리과

## 2. 재료 및 방법

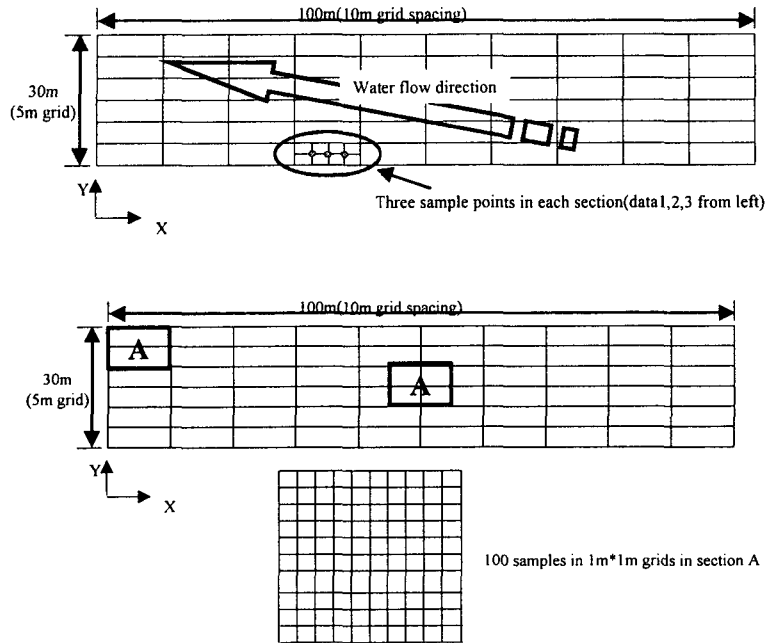


Figure 1. 포장의 형상과 벼 수확량 샘플링 위치(위), 토양샘플링 전략(아래).

시험포장은 우리나라의 전형적인 수도 포장으로써, 100m×30m 직사각형 모양의 농업기계화연구소 포장(위도 : 37.2843033, 경도 : 126.9564617)이었다. 관개수는 (그림 1)에서와 같이 오른쪽 아래에서 왼쪽 위로 흐르며 1999년의 연평균 기온은 12.8C, 강수량은 1,557mm이었다(기상청 홈페이지). 토양 분류는 Coarse loamy, mixed, nonacid, mesic family of Aguiic Fluventic Eutrochrepts(토양도감 : 토양조사 자료, 농업기술원, 1984)이었다.

변이분석의 대상은 벼 수확량, 엽록소 함량, 10가지 토양 기본속성으로 하였다. 벼 수확량(ton/ha)은 1999년 10월 13일에 수작업으로 측정하였는데, 포장 장변방향으로 10m, 단변방향으로 5m의 직교 소구획으로 나누어 각 구획에서 5주씩 3번 샘플링하여 손으로 탈곡하고 전자저울과 휴대형 함수율 측정기로 무게와 함수율을 측정함 다음, 14%의 함수율로 수확량을 보정하였다(180 샘플). 많은 연구자들에 의해 벼 생육상태의 지표로 사용되고 있는 엽록소 함량은 출수전인 1999년 6월 6일에 SPAD(Soil and Plant Analyzer Development) meter(Minolta, Japan)로 측정하였다. 단위 소구획은 2m×2m 크기였으며(750 샘플), 각 구획에서 30번씩 임의 지점에서 측정하여 평균치를 구하였다. 토양은 1999년 10월 28일 벼 수확 후 1~15cm 깊이에서 혼합샘플(composite sample)을 채취하여, 농업과학기술원 토양관리과에서 분석하였다. 토양 샘플링은 3가지로 샘플링 소구획을 달리하여 채취하였다 : 우선 포장을 10m×5m(60 samples) 소구획으로 나누어 각 구획의 중심에서 샘플링하고, (그림 1)의 "A"로 표시된 것 처럼 포장 중앙과 왼쪽 상부에서 100개의 샘플링을 각각

채취하고(200 samples), 마지막으로 20m×10m의 소구획에서 15개의 샘플을 채취하였다. 농업과학 기술원 토양관리과에서 분석된 10가지 기본 토양속성은 pH, EC(dS/m), OM(%), P2O5(ppm), Ca(cmol/kg), K(cmol/kg), Mg(cmol/kg), Na(cmol/kg), Total N(%), SiO2(ppm) 이었는데, 각 속성의 적정범위는 아래와 같다. 참고로, 이 속성들 중에서 N, P, K 비료의 시비량 추천에 사용되는 속성들은 OM, SiO2, P2O5, K 등이다.

pH : 6.0~7.0	EC : 2dS/m이하	OM : 2.5~3.0
P2O5 : 80~120	Ca : 5~6	K : 0.25~0.30
Mg : 1.5~2.0	Na : 중요하지 않음	T-N : 0.2이하 SiO2 : 130~180

수집한 포장 데이터의 공간변이를 이해하기 위하여 기술통계(descriptive statistics)와 지리통계(geo-statistics)분석을 실시하였다. 포장데이터는 소변이(small scale variation)와 대변이(large scale variation called as "trend")로 나누어지는데, 특히 대변이에는 측정과 샘플링 오차, 데이터 취득포장의 기하학적 특성, 기후 등의 영향이 포함되기 쉽기 때문에 이러한 경향(trend)는 제거해야 한다. 본 연구의 경우, 포장 데이터 획득시 포장 왼쪽에서 차례로 오른쪽으로 진행하면서 측정하였기 때문에 시간적인 차이가 생기고 결국, 데이터에 어떠한 경향이 생길 수 있다. 또한, 단변과 장변으로 이루어진 포장의 기하학적 형상과 관개수의 흐름방향도 데이터에 대변이를 추가할 수 있다. Sadler 등(1998)은 수확량 데이터의 경향제거(trend removing)을 위하여 각 데이터 셀을 경향표면에 적합시키고, 각 데이터 값을 이 경향표면에 대하여 구한 다음, 원래 데이터에서 적합표면값을 빼주었다.

경향제거의 또 다른 방법으로 그리드 샘플링 된 자료에 대해서 많이 사용되는 중심값 제거(median polishing)기법이 있다. 중심값 제거 기법에서는 (식 1)과 같이 원시자료(Y<sub>ij</sub>)를 전체 중심값( $\bar{r}$ ), 행방향 중심값( $\bar{c}_j$ ), 열방향 중심값( $\bar{r}_i$ ), 잔차(R)의 합으로 나타낸다(Bakhsh et al., 2000).

$$Y_{ij} = \bar{m} + \bar{r}_i + \bar{c}_j + R_{ij} \quad (1)$$

중심값 제거는 S-Plus ver. 4.0(MathSoft, NY)를 사용하였다. 기술통계값은 SAS ver. 6.12(SAS Institute Inc., NC)내의 UNIVARIATE proc으로 수행하였다. 포장데이터의 공간적 변이구조해석을 위한 지리통계분석은 GS+ ver. 3.1(Gamma Design Software, MI)로 수행하였고 샘플링 되지 않은 지역의 속성값 추정(Kriging local estimation)은 Surfer® ver. 7(Golden Software Inc., Colorado)를 사용하였다. 모든 분석은 원시데이터와 경향제거된 잔차에 대해서 수행되었으며, 특히 토양자료는 전체자료와 "A"지역에 대하여 각각 수행하였다. 래그 값(h)에서의 반변이  $\gamma(h)$ 는 두 샘플링 지점의 측정값  $z_i, z_{i+h}$ 에 대하여 (식 2)와 같이 구한다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z_i - z_{i+h})^2 \quad (2)$$

### 3. 결과 및 고찰

기술통계 분석의 결과 중, 원시데이터 전부에 대한 결과를 (표 1)에 나타내었다. 원시데이터와 잔차데이터의 결과를 비교한 결과, 잔차의 평균은 0에 근접했으며 표준편차를 상당히 감소하였다. 또한 데이터분포의 범위와 skew는 감소하였고, kurtosis는 증가하였다. 수확량, EC, P2O5, Ca, K, Mg, Na, SiO2는 다른 속성들에 비하여 넓은 범위를 가지고 있었다. 이제까지 한국의 무는 수도포장은 규모가 작고 관개가 되기 때문에 속성값의 차이가 위치별로 거의 없다고 간주되었으나, 본 연구의 결과 상당한 위치별 차이가 있음을 알 수 있으며, 특히 수확량의 경우 많은 곳이 적은 곳의 2배 이상이었다. 농업과학기술원에서 제공한 속성들의 적정범위와 비교할 때, 대부분의 속성들이 매우 부족한 상황이어서 위치별 특성에 맞는 투입으로 농자재 투입량 감소를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 1. Descriptive statistics for whole raw data sets

	Yield	SPAD	pH	EC	OM	P2O5	Ca	K	Mg	Na	T-N	Sio2
Min	3.828	32.4	5.02	0.17	1.7	65	3.1527	0.5473	0.6624	0.1609	0.13	54
Max	8.5485	39.5	6.41	1.58	2.9	188	6.1128	1.4719	1.3412	0.9217	0.18	172
Mean	6.1008	36.714	5.8949	0.4089	2.3336	119.4818	4.3325	0.6893	0.9036	0.2867	0.1504	86.1168
Median	6.1386	36.75	5.905	0.41	2.3	118	4.3456	0.6856	0.9022	0.2715	0.15	83
STD	0.9310	0.9885	0.1872	0.1442	0.14937	15.5095	0.6851	0.0735	0.1483	0.0748	0.0081	17.9862
Skew	0.0468	-0.2442	-1.1079	2.8200	-0.1239	0.5466	0.3321	4.7283	0.6202	3.1735	0.3893	1.3745
Kurtosis	-0.2272	0.2627	4.6698	17.5309	2.3033	2.5488	-0.578	47.0828	-0.0268	20.2163	0.4117	3.0707

반변이도(semi-variogram)를 통한 공간 독립성 분석의 결과를 등방형 모델(isotropic models)에 대하여, 모델, nugget, sill, range, Q, 회귀계수로 (표 2)에 요약하여 나타내었다. 모델의 선정은 육안으로 보아 명확한 경향이 보이는 경우를 제외하고는 회귀계수가 높은 것으로 하였다. 변이도를 해석적으로 신뢰성을 가지고 평가하는 방법이 아직 정립되지 않았으며, 일반적으로 샘플링수가 많을수록 더욱 좋은 반변이를 추정할 수 있다는 정도이다. 1차원 분석의 경우 최소한 100개 이상의 샘플링을 해야 하며 변이도 작성에 시험지역 길이의 1/5이하로 하는 것이 좋은 것으로 추천되고 있다(Webster, R. and M.A. Oliver, 1990). 본 연구에서는 GS+ 사용시, active lag distance와 lag interval을 수확량과 SPAD값에 대해서는 각각 30m, 2.5m로 설정하였고 토양속성에 대해서는 30m, 1.5m로 설정하였다.

등방형 모델(isotropic models)이 비등방형 모델(anisotropic model)에 비항 대체적으로 높은 회귀계수값을 보였으며, 등방형 모델로 보았을 때, 비 수확량과 SPAD값의 공간 독립의 한계는 11.54m과 6.51m로 나타났고, 토양 속성에 대해서는 P2O5, T-N, SiO2의 경우 상대적으로 다른 토양 속성값에 비하여 작은 range를 보였고 다른 속성값들은 active lag distance인 30m 부근으로 나타나서 보다 조밀한 샘플링 간격으로 보다 많은 양의 샘플

측정값으로 변이를 분석해야 함을 알 수 있다. 잔차에 대한 모델에서는 대부분 range가 감소하였고, 특히, Ca와 Mg는 경향제거의 효과가 뚜렷하였다.

Table 2. Selected isotropic models for whole raw data sets

Property	Model	Nugget (Co)	Sill (Co+C)	Range (Ao)	O (C/Co+C)	R <sup>2</sup>
Yield	SPHR	0.3020	0.8070	11.54	0.626	0.814
SPAD	EXPN	0.2120	0.7450	6.51	0.715	0.852
pH	SPHR	0.0110	0.0292	10.79	0.623	0.478
EC	LINR	0.0161	0.0227	29.20	0.293	0.002
OM	LINR	0.0186	0.0263	29.20	0.293	0.000
P205	SPHR	17.8	228.1	4.02	0.922	0.456
Ca	LINR	0.0750	0.2844	29.20	0.736	0.940
K	GAUS	0.0023	0.0166	32.94	0.864	0.788
Mg	LITS	0.0032	0.0143	27.74	0.776	0.978
Na	LINR	0.0040	0.0056	29.20	0.292	0.542
T-N	EXPN	0	0	4.53	0.787	0.478
Sio2	LITS	105.30	278.90	12.78	0.822	0.731

(그림 2)는 수확량 데이터에 대한 대변이(active lag distance : 75m)와 소변이(active lag distance : 30m)를 보여주고 있다. (그림 2 (a), (b))에서는 최소한 2개 이상의 서로 크기가 다른 공간 변이가 있음이 뚜렷하고 비등방 변이도에서도 확인할 수 있다. 경향제거된 잔차에 대하여 보다 정확한 소변이를 얻을 수 있는데, 1m 보다 조밀한 샘플링으로 보다 작은 범위를 변이를 추정하는 것이 필요함을 알 수 있다.

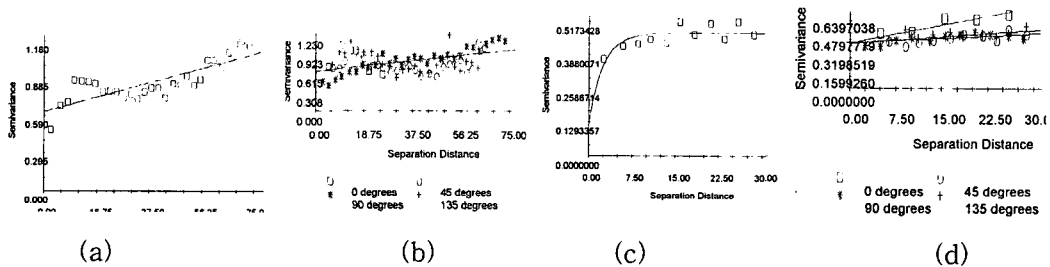


Figure 2. Isotropic and anisotropic semi-variograms of rice yield with active lag distance up to 75m((a) and (b)), and up to 30m((c) and (d)).

샘플링 되지 않은 부분의 국부 보간(local estimation)을 위해서, Surfer ver 7.0으로 점 크리깅(point Kriging)을 실시하였고 pH에 대하여 그 대표적인 예를 (그림 3)에 나타내었다. (그림 4)의 (a), (b), (c)를 통해서, 우리나라의 작은 포장에서도 대변이와 소변이가 명확하게 존재한다는 것을 알 수 있으며 (d)와 (e)를 통하여 대변이가 경향제거 기법으로 상당히 없어진다는 것을 알 수 있다.

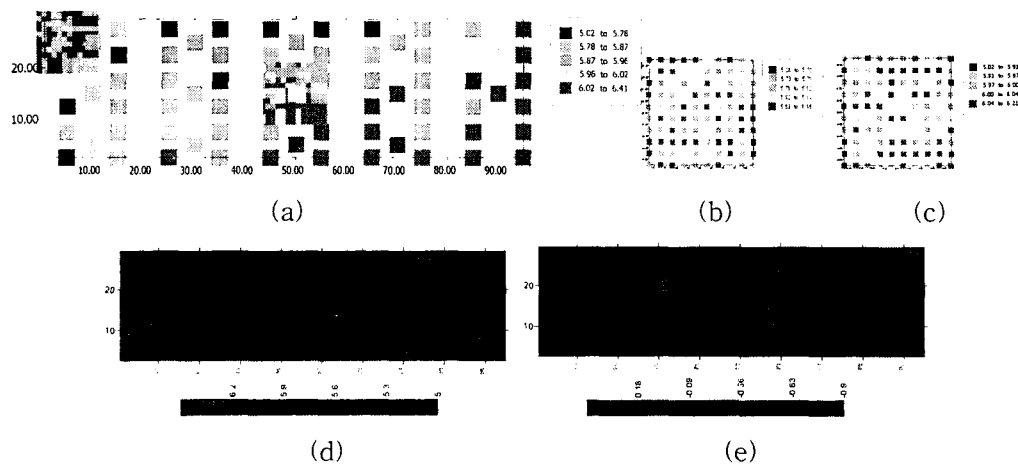


Figure 3. Posted maps for whole data set(a), left top corner section(b), middle section(c), and point Kriged maps for whole raw data set(d), and median polished residuals(e) with linear variogram model for soil pH(slope=1, no drift, anisotropy ratio=1, anisotropy angle=0).

#### 4. 참고문헌

1. Ancha Srinivasan. 1998. Precision farming in Asia: Prospects and Progress. Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture, St. Paul. Editors : Robert P.C., Rust R.H., Larson W.E. American Society of Agronomy, Wisconsin.
2. Bakhsh, A. et al. 2000. Spatio-temporal Analysis of Yield Variability for a Corn-soybean Field in Iowa. Trans. ASAE 43(1) : 31-38.
3. Golden Software, Inc. 1999. Surfer® Users Guide. Version 7. Colorado, USA.
4. Hergert G.W., et al. 1995. Classical Statistical and Geostatistical Analysis of Soil Nitrate-N Spatial Variability. p. 175-185. In P.C. Robert et al.(ed.) Site-specific Management for Agricultural Systems. ASA Misc. Publ., ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
5. Sadler J.E. et al. 1998. Agronomic Models : Spatial Scale Requirements for Precision Farming(A Case Study in the Southeastern USA). Agron. J. 90 : 191-197.
6. Kaluzny, S.P., et al. 1997. S-PLUS Spatial Stats Users Manual Ver. 1.0. Springer-Verlag, New York, NY, USA.
7. Oliver M.A. 1999. Exploring Soil Spatial Variation Geostatistically. Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture, J.V. Stafford(Ed.), Sheffield Academic Press.
8. Robertson, G.P. 1998. GS+ : Geostatistics for the Environmental Sciences. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA.
9. SAS Institute Inc. SAS/STAT™ Guide for Personal Computers, Version 6.02 Edition. Cary, NC:SAS Institute Inc., 1998.
10. Webster, R. and M.A. Oliver. 1990. Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey. New York, Oxford University Press.