

# 벼 수확량과 제한요인간의 상호관계

## Relationships between Rice Yield and Its Limiting Factors

정선옥*	김상철*	정인규*	이동현*
정회원	정회원	정회원	정회원
S.O.Chung	S.C.Kim	I.G.Jung	D.H.Lee

### 1. 서론

최근에 미래형 농법으로 관심을 끌고 있는 정밀농업은 포장간/포장내 위치별 특성에 맞는 작물 재배관리라는 의미를 가지고 있다. 위치별 특성에 맞는 작물재배 관리를 위해서는 해당 위치마다 수확량, 생육상태, 기후, 토양조건 등 속성정보를 획득하고 이 획득된 정보를 바탕으로 적절한 농자재 투입을 위한 의사결정을 내려야 한다. 최적의 의사결정을 내리기 위해서 작물의 수확량과 제한요인들의 상호관계를 이해하는 것이 필수적이다 (Sudduth et al, 1996).

수확량과 제한요인들의 상관관계는 처음에는 전통적인 양분추천 절차를 통하여 이루어 졌으나 이러한 방법의 단점은 1) 넓은 면적의 속성정보를 평균적으로 취급한 결과이므로 정밀농업의 개념에 위배되며, 2) 수확량에 영향을 미치는 제한요인들을 모두 고려해서 양분을 추천한다는 것이다. 이제까지의 연구결과들은 대부분 데이터 셀(data set)간의 단순 상관분석(simple correlation analysis)과 다변량 회귀분석(multivariate regression analysis)이 주를 이루고 있다(Mallarino et al., 1996, Cambardella et al., 1996). Drummond 등 (1995)은 옥수수과 콩의 수확량, 토양 양분, 표토 깊이에 대한 위치별 데이터로 직선상관, 다중 직선회귀, 신경망 분석, PPR(projection pursuit regresssion)등의 방법으로 심층적인 분석을 수행하였는데, 신경망 분석 같은 비 선형분석과 projection pursuit regression 등의 분석을 수행하기 위해서는 수 천 지점 이상의 데이터가 있어야 한다.

상관관계 분석의 한 가지로 독립변수들의 종속변수에 대한 영향을 직접적인 영향(direct effects)과 간접적인 영향(indirect effects)로 나누어 고찰하는 경로분석(path analysis)이 많은 연구자들에 의해 사용되고 있으며(Yatar Kasap et al., 1998), 특히 벼의 수확량과 제한요인간의 관계에 대한 경로분석도 연구되고 있다(Gravois et al., 1992, Pantone et al., 1992).

우리나라에서도 최근, 정밀농업에 대한 관심과 기초연구가 급증하고 있으나, 데이터 획득의 어려움 등으로 인하여 연구 초기단계에서 반드시 수행되어야 할 변수들의 시·공간적 변이와 지리 참조된(geo-referenced) 이 변수들간의 상호 연관관계에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 우리나라의 표준 수도포장 구획인 100m×30m 포장에서 획득된 벼 수확량, 생육 중 엽록소 함량, 수확 후 토양속성에 대한 공간자료(spatial variables)로 단순상관 관계분석, 경로분석을 통하여 수확량과 제한요인간의 관계를 고찰하고자 하였다.

---

\* 농촌진흥청 농업기계화연구소 생물생산기계과

## 2. 재료 및 방법

### 데이터 준비

시험포장은 우리나라의 전형적인 수도 포장으로써, 100m×30m 직사각형 모양의 농업기계화연구소 포장(위도 : 37.2843033° , 경도 : 126.9564617° )이었으며 수확량은 1999년 10월 13일 포장 장변방향으로 10m, 단변방향으로 5m의 소구획을 나누어 각 구획에서 5주씩 3번 샘플링하여 180 지점에서 자료를 얻었다. 벼 생육상태의 지표가 되는 엽록소 함량은 출수전인 1999년 6월 6일에 SPAD(Soil and Plant Analyzer Development) meter(Minolta, Japan)로 2m×2m 소구획마다 측정하여 750지점의 값을 측정하였다. 토양속성은 275지점에서 샘플링을 채취하여 실험실 분석을 실시하였다(데이터 획득 및 처리과정에 대한 자세한 내용은 2000년 한국농업기계학회 학술대회 논문집 “수도포장에서의 벼 수확량, 엽록소 함량, 토양속성 공간변이”를 참조하기 바람).

위의 방법으로 획득된 데이터들은 샘플링 위치와 샘플링 수가 각기 다르기 때문에 상관관계 및 경로분석을 실시하기 위해서 속성별로 샘플링 위치를 같도록 처리하였다. 그 방법은, 가장 큰 소구획 크기를 가진 속성을 우선 선정하고 그 속성의 샘플링 위치와 가장 가까운 다른 속성값들의 위치를 그 위치로 대치하였다(nearest neighboring). 이러한 방법으로 87개의 위치와 위치별 속성값을 얻을 수 있었다.

### 상호관계 분석

단순 상관관계 분석(simple correlation analysis)과 경로분석을 위한 표준화된 편회귀계수(standardized partial regression coefficient)는 SAS ver 6.21(SAS Institute Inc., NC)의 FACTOR proc과 REG proc을 이용하였다.

경로분석은, 1921년 Wright에 의해 고안되었는데 상관관계(correlation)와 인과관계(causation)을 구분하여 독립변수들의 종속변수에 대한 직접적인 영향(direct effects)와 간접적인 영향(indirect effects)을 정량적으로 평가하는 방법이다(Gravois et al., 1992).

Williams 등(1990)은 경로분석 결과해석의 편의성을 위하여 표기법을 제시하였는데, 5가지 독립변수( $x_1 \sim x_5$ )와 종속변수( $x_6$ )에 대한 경로도(path diagram)와 정규식(normal equation)을 (그림 1)과 (식 1)로 각각 나타내었다. 여기서  $r$ 은 단순 상관계수를 나타내며,  $p$ 는 표준화 편회귀계수를 나타낸다.

$$\begin{aligned} p_{16} + r_{12}p_{26} + r_{13}p_{36} + r_{14}p_{46} + r_{15}p_{56} &= r_{16} \\ r_{12}p_{16} + p_{26} + r_{23}p_{36} + r_{24}p_{46} + r_{25}p_{56} &= r_{26} \\ r_{13}p_{16} + r_{23}p_{26} + p_{36} + r_{34}p_{46} + r_{35}p_{56} &= r_{36} \\ r_{14}p_{16} + r_{24}p_{26} + r_{34}p_{36} + p_{46} + r_{45}p_{56} &= r_{46} \\ r_{15}p_{16} + r_{25}p_{26} + r_{35}p_{36} + r_{45}p_{46} + p_{56} &= r_{56} \end{aligned} \quad (1)$$

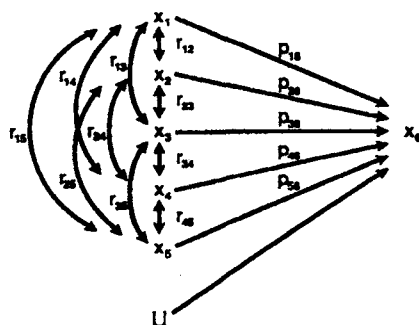


Figure 1. Path diagram for five predictor variables and response variable.  
U is the undetermined portion or residual.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용된 87지점에서의 벼 수확량, SPAD값, 10가지 토양속성의 평균과 표준편차를 (표 1)에 요약하였으며, 각 변수간의 단순상관계수를 (표 2)에 나타내었다.

Table 1. Means and standard deviations from selected 87 points

	Yield	Chloro	pH	EC	OM	P2O5	Ca	K	Mg	Na	T-N	SiO2
Mean	6.0517	36.6103	5.9285	0.4340	2.3655	120.2759	4.7023	0.6845	0.9826	0.2907	0.1501	93.5517
STD	0.9572	0.9977	0.2182	0.1200	0.1508	14.2484	0.7066	0.0961	0.1649	0.0562	0.0083	23.6263

Table 2. Simple correlation coefficients for the variables

	Yield	Chloro	pH	EC	OM	P2O5	Ca	K	Mg	Na	T-N	SiO2
Yield	1.0000											
Chloro	0.1582	1.0000										
pH	0.0282	0.3485	1.0000									
EC	0.2421	0.2473	0.2153	1.0000								
OM	-0.0152	-0.1892	0.0836	-0.0064	1.0000							
P2O5	-0.1363	-0.3907	-0.3163	-0.3105	0.0721	1.0000						
Ca	0.1947	0.5838	0.6794	0.4859	-0.0167	-0.4631	1.0000					
K	-0.1546	-0.1054	-0.0681	-0.0327	0.0255	0.2481	-0.1283	1.0000				
Mg	0.1900	0.5859	0.6887	0.5094	-0.0158	-0.4781	0.9781	-0.1366	1.0000			
Na	0.0203	0.3880	0.3414	0.2634	0.0240	-0.1566	0.4989	-0.1128	0.4346	1.0000		
T-N	-0.0541	-0.0761	0.0496	-0.0005	0.3197	0.0480	-0.0519	-0.0059	-0.0550	-0.0142	1.0000	
SiO2	0.2028	0.5395	0.5886	0.4483	0.0566	-0.3905	0.6981	0.0292	0.6874	0.5724	0.0324	1.0000

(표 2)의 결과에서 특이한 것은, 벼 수확량과 생육중인 상태의 벼 엽록소 함량간의 상관관계수(0.1582)가 그다지 높지 않다는 것이다. 이러한 이유는, 엽록소 함량이 높은 부분은 생육이 왕성한 것으로 그 지점의 수확량 또한 높아야 하겠으나, 벼가 성숙한 후에 장마기간과 장마 후 병해충의 피해로 인하여 높은 상관관계를 보이지 않은 것으로 사료되었다.

작물 생육상태의 지표로 사용되고 있는 SPAD값은 토양의 다른 속성보다도 Ca(0.5838), Mg(0.5859), SiO<sub>2</sub>(0.5395)와 비교적 높은 정상관을 보였고 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(-0.3907)과는 역상관을 보였다.

Table 3. Path analysis direct effects(diagonal, underlined) and indirect effects of limiting factors on rice yield and SPAD readings

Yield	pH	EC	Ca	K	Mg	Na	SiO <sub>2</sub>	r	R <sup>2</sup>
pH	<u>-0.1974</u>	0.0329	0.3529	0.0125	-0.2638	-0.0790	0.1701	0.0282	0.1420
EC	-0.0425	<u>0.1527</u>	0.2524	0.0060	-0.1951	-0.0609	0.1296	0.2422	
Ca	-0.1341	0.0742	<u>0.5194</u>	0.0235	-0.3746	-0.1154	0.2018	0.1948	
K	0.0134	-0.0050	-0.0666	<u>-0.1833</u>	0.0523	0.0261	0.0084	-0.1547	
Mg	-0.1359	0.0778	0.5080	0.0250	<u>-0.3830</u>	-0.1005	0.1987	0.1901	
Na	-0.0674	0.0402	0.2591	0.0207	-0.1665	<u>-0.2313</u>	0.1654	0.0202	
SiO <sub>2</sub>	-0.1162	0.0685	0.3626	-0.0054	-0.2633	-0.1324	<u>0.2890</u>	0.2028	
Chlo	pH	EC	OM	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mg	Na	SiO <sub>2</sub>	r	R <sup>2</sup>
pH	<u>-0.1802</u>	-0.0336	-0.0148	0.0389	0.3368	0.0343	0.1670	0.3484	0.4588
EC	-0.0388	<u>-0.1562</u>	0.0011	0.0382	0.2491	0.0265	0.1272	0.2471	
OM	-0.0151	0.0010	<u>-0.1771</u>	-0.0089	-0.0077	0.0024	0.0161	-0.1893	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.0570	0.0485	-0.0128	<u>-0.1230</u>	-0.2338	-0.0158	-0.1108	-0.3907	
Mg	-0.1241	-0.0796	0.0028	0.0588	<u>0.4891</u>	0.0437	0.1951	0.5858	
Na	-0.0615	-0.0411	-0.0043	0.0193	0.2126	<u>0.1006</u>	0.1624	0.3880	
SiO <sub>2</sub>	-0.1061	-0.0700	-0.0100	0.0480	0.3362	0.0576	<u>0.2838</u>	0.5395	

Standardized partial regression coefficients are obtained at P<0.05

토양 속성이 벼 생육상태와 수확량에 대한 영향을 분석한 경로분석의 결과를 (표 3)에 나타내었다. 단순 상관관계 분석과 유사하게 토양속성과 수확량과의 다변량 직선회귀의 결정계수(0.1420)보다 토양속성과 SPAD값의 회귀 결정계수(0.4588)가 높게 나타났다.

벼 수확량에 대한 경로분석의 결과, EC(0.2422), Ca(0.1948), Mg(0.1901)가 비교적 높은 정상관을 보였고 K(-0.1547)은 역상관을 보였다. 수확량에 대한 직접적인 효과는 Ca(0.5194)가 가장 높았으며 Mg(-0.3746)를 통한 간접적인 영향을 미치고 있음을 추정할 수 있다. 수확량에 대한 pH의 직접적인 효과보다는 Ca(0.3529)와 Ca의 Mg(-0.2638)을 통한

간접적인 효과가 높음을 알 수 있다. Mg의 직접적인 효과(-0.3830)보다는 Ca(0.5080)를 통한 효과가 컸으며 SiO<sub>2</sub>는 직접적인 효과와 Ca를 통한 간접적인 효과가 각각 0.2890과 0.3626이었다.

벼의 생육에는 Mg(0.5858), SiO<sub>2</sub>(0.5395), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(-0.3907), Na(0.3880), pH(0.3484)의 순으로 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, Mg의 직접효과(0.4891)이 가장 큰 것으로 나타났다. pH, EC, Na, SiO<sub>2</sub>는 각각 Mg(0.3368), Mg(0.2491), Na(0.1624), Mg(0.3362)를 통한 간접효과가 큰 몫을 차지하고 있어 주로 Mg의 함량이 벼의 생육에 크게 기여하는 것으로 분석되었다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라 표준구획인 100m×30m 수도포장에서 획득한 벼 수확량, SPAD값, 토양속성값간의 상호관계를 단순상관분석과 경로분석을 통하여 고찰하였다. 본 연구에 포함되지 않은 기후, 병해충 등의 원인으로 인하여 벼 수확량과 생육중인 상태의 벼 엽록소 함량이 높은 상관관계를 보이지 않았고, SPAD값은 Ca, Mg, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>와 비교적 깊은 상관관계가 있었다.

경로분석을 통하여 각 토양속성의 수확량과 생육에 미치는 직접적인 영향과 다른 성분들을 통한 간접적인 영향을 고찰한 결과, 유의수준 5%에서 수확량과는 0.1420, SPAD값과는 0.4588의 회귀 결정계수 값을 얻었으며, 수확 후 토양 중 Mg의 함량이 수확량과 생육에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 하지만, 자료 획득의 시간적인 차이, 자료의 양 등으로 인하여 본 연구의 결과를 일반화하기는 어려울 것이다.

#### 5. 참고문헌

1. Cambardella, C.A. et al. 1996. Soil property contributions to yield variation patterns. Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, St. Paul. Robert P.C., Rust R.H., and W.E. Larson(ed). ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
2. Drummon, S.T. et al. 1995. Analysis and correlation methods for spatial data. ASAE paper 95-1335. Am. Soc. Agric. Engrs., St. Joseph, MI.
3. Gravois, K.A. and R.S.Helms. 1992. Path analysis of rice yield and yield components as affected by seeding rate. Agron. J. 84:1-4.
4. Mallarino, A.P. et al. 1996. Multivariate analysis as a tool for interpreting relationships between site variables and crop yields. Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, St. Paul. Robert P.C., Rust R.H., and W.E. Larson(ed). ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.

5. Pantone, D.J. et al. 1992. Path analysis of red rice(*Oryza sativa* L.) competition with cultivated rice. *Weed science*. 40:313-319.
6. SAS Institute Inc. SAS/STAT™ Guide for Personal Computers, Version 6.02 Edition. Cary, NC:SAS Institute Inc., 1998.
7. Sudduth, K.A. et al. 1996. Analysis of spatial factors influencing crop yield. *Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*, St. Paul. Robert P.C., Rust R.H., and W.E. Larson(ed). ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
8. Williams, W.A., M.B.Jones, and M.W.Demment. 1990. A concise table for path analysis statistics. *Agrono. J.* 82:1022-1024.
9. Yatar Kasap. et al. 1998. Path analysis of some heavy metal adsorption by soil. *Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture*, St. Paul. Editors : Robert P.C., Rust R.H., Larson W.E. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.