

화학비료 및 퇴비 長期施用에 따른 벼 뿌리 분포 특성

전원태* · 박창영* · 조영손* · 박기도* · 윤율수* · 강위금* · 박성태* · 최진룡**

*영남농업시험장, **경상대학교

Spatial Distribution of Rice Root under Long-term Chemical and Manure Fertilization in Paddy

Weon-Tai Jeon*, Chang-Young Park*, Young-Son Cho*, Ki-Do Park*, Eul-Soo Yun*,
Ui-Gum Kang*, Sung-Tae Park* and Zhin-Ryong Choe**

*National Yeongnam Agricultural Experiment Station, Milyang, 627-802, Korea

**Department of Agronomy, Gyeongsang National University, Chinju, 660-701, Korea

ABSTRACT : It is well known that root distribution of rice is a crucial factor for nutrient absorbtion and affect by soil fertility management. However, the findings on root distribution are limited due to laborious and tedious work. The characteristics of root distribution were investigated in long-term fertilizer experiment plots that were established in paddy soil, a fine silty family of typic Halpaqueps (Pyeongtaeg series) in 1967. Fertilizer experiment plots of no fertilizer, compost, NPK and NPK+compost plot have been maintained consistently for the past thirty six years and NPK+silicate plot for the past twenty two years. In NPK plot, 150 kg N (urea), 100 kg P₂O₅ (fused phosphate) and 100 kg K₂O (potassium chloride) per hectare have been applied. For NPK+silicate plot, 500 kg SiO₂ (silicate) was applied in addition to fertilizer in NPK plot. For the compost plot, 10,000 kg rice straw compost per hectare were applied. Root samples were taken from the positions of hill-center (below hill) and mid-point of four adjacent rice hills at heading stage by cylinder monolith (CM) method. The soil cores were sampled 20 cm depth from the soil surface and partitioned four into layers at an interval of 5cm. The soil particles surrounding roots were washed out with tap water. Length and weight of the roots in each soil layer were measured and root length density (RLD), root weight density (RWD), specific root length (SRL) and rooting depth index (RDI) were calculated. Total root length was measured by intersection method. Plant height, tiller and shoot dry weight were the highest in NPK+compost plot. But RLD of hill-center soil cores was the highest in no-fertilizer plots. In the soil cores from mid-point position of four adjacent hills, RLD at 15-20 cm soil depth was higher in compost plot than NPK plot. RLD in compost plots showed even distribution compared to those in chemical- fertilizer plots. RWD was the highest in

the NPK+compost plot. SRL was the lowest in the NPK+silicate plot. RDI was the highest in the compost plot. Also, in this experiment it was found that the distribution of roots was closely related to the physical properties of the soil as affected by fertilization management.

Keywords : Rice, Root, Long-term, Fertilizer, Compost

Böhm(1979)은 자연 포장상태에서 뿌리연구를 “A step-child of science”이라 하여 뿌리연구의 어려움을 표현하였다(Smit *et al.*, 2000). 이는 뿌리연구가 많은 시간과 노동력을 소비하고도 유의성 있는 성적을 내기가 어렵기 때문이다. 그러나 뿌리는 식물체의 보이지 않는 절반이며(Waisel *et al.*, 1996) 뿌리의 기능은 식물체를 고정 지지하고 양·수분을 흡수하며 물질의 저장, 분배, 일부 호르몬(Hormone)류의 합성 등의 중요한 역할을 한다(신, 1988; 전, 2001). 이들 기능 중 양·수분의 흡수기능은 토양 중에 함유되어 있는 이용 가능한 양분의 농도와 토양 중의 작물 뿌리 밀도에 의해서 좌우된다(Barley, 1970; Newman & Andrews, 1973). 즉 지하공간에서 단위면적 당 뿌리가 점유하는 면적 즉 지하공간에서 뿌리의 분포형태가 양분흡수의 중요한 요인이 된다(신, 1988). 양분흡수의 중요한 형질인 근장에 대한 연구는 Newman(1966)이 최초로 확립한 후, Marsh(1971)는 Newman의 방법을 간단히 정리하였고, 다시 Tennant(1975)이 검정, 보완 완성되었다.

벼 관근의 신장은 질소 무시용구에서 가장 왕성하고, 질소 사용량이 많게 되면 짧아지는 경향이 있다. 즉 질소의 사용량이 적어지면 근계는 廣域化되고, 많으면 陝域化 된다(川田 등, 1977). 일반계 품종의 벼 뿌리는 90% 이상이 토심 15cm 이내에 분포한다고 보고하였다(森田 *et al.*, 1986). 또한, 경운에 의한 토양환경의 변화는 밀의 뿌리 발육과 분포에 영향을 미쳐서, 경운구에 비해 무경운구에서 뿌리 건물중이 증가한다고

†Corresponding author: (Phone) +82-55-350-1282 (E-mail) jeon0550@rda.go.kr

<Received September 22, 2003>

알려져 있다(Wilhelm, 1998).

우리 나라에서 벼 뿌리에 대한 연구는 품종과 도복 관련 연구(Kang *et al.*, 2001; 장 등, 1999)중심으로 수행되었으며, 벼 생육기간 중 비료 및 토양 관련 연구가 상대적으로 미흡하다. 또한 장기적으로 동일한 시비처리를 하여 벼 뿌리 분포 특성을 보고한 것은 미미한 실정이다.

따라서 본 연구는 벼 재배의 기초 자료를 얻고자 화학비료와 퇴비를 장기 연용한 시험구의 토양 이화학성 변화와 뿌리 분포 특성을 구명하기 위하여 수행되었다.

재료 및 방법

본 시험은 2002년에 경남 밀양시 영남농업시험장 시험포장 내 동일한 화학비료와 퇴비를 長期施用한 논 토양에서 벼 뿌리의 분포양상을 구명하기 위하여 수행되었다.

시험토양은 하성평탄지의 하성충적층을 모재로 한 경사 0~2%, 배수등급은 “약간 불량”한 미사식양질토인 평택통(Fine silty, mixed, nonacid, mesic family of Typic Haplaquepts)이었다.

처리내용은 1967년부터 2002년까지 36년간에 걸쳐 무비구, 퇴비단용구, 삼요소구, 삼요소+퇴비구로 이루어져 있으며, 1981년부터 2002년까지는 삼요소+규산구를 추가하였다.

시험품종은 화삼벼를 재식거리 30×12 cm로 주당 3본씩 2002년 6월 4일 손이앙 하였다. 삼요소구의 시비량은 N-P₂O₅-K₂O = 150 - 100 - 100 kg ha⁻¹을 엮으며, 질소와 칼리는 기비 : 분얼비 : 수비 : 실비로 나누어 각각 50 : 20 : 20 : 10%와 70 : 0 : 30 : 0%의 비율로 분시하였으며, 인산은 전량기비로 사용하였다. 규산은 ha당 500 kg, 퇴비는 볏짚으로 만든 완숙퇴비를 ha당 10,000 kg 사용하였다.

벼 뿌리 조사는 원통모노리쓰법(Morita *et al.*, 1996)에 준하여 출수기에 직경 15 cm, 길이 40 cm 원통을 이용하여 株

下(BH)와 4개주의 중간인 株間下(MH)에서 5 cm 간격으로 20 cm 깊이까지 채취하였다. 총 뿌리길이는 교차법을 이용하여 계산하였다(Tennant, 1975). 벼 뿌리 건물중은 길이를 측정된 뿌리를 75°C에서 48시간 이상 건조기에서 건조 후 측정하였다. 根長密度는 단위 토양용적 당 포함된 총 뿌리 길이로 계산하였다(Kang *et al.*, 1994). 根重密度는 단위토양용적 당 총 뿌리의 무게(mg cm⁻³)로 나타내었다(Cheema *et al.*, 1979). 비근장은 근장을 근중으로 나누어 계산하였다(Kang *et al.*, 1994; Eissenstat, 1992). 뿌리깊이지수(Rooting depth index; RDI)는 Oyanagi(1993) 등이 원래 밀 뿌리 연구에서 처음 사용하였으나 Morita와 Abe(1996)에 의해서 벼 뿌리연구에도 많이 적용된 개념으로 근계에서 벼 뿌리가 수직적으로 분포하는 정도를 나타낸 것이다. 이 지수의 계산은 각각의 토층 깊이의 중간값(평균값)에 각각의 토층에 포함되어 있는 근장이나, 근 건물중을 근계 전체 비율로 곱한 것을 합산하여 계산하였다.

토양 삼상, 용적밀도, 공극률은 100 cm³ 코어를 사용하여 토심별 3반복으로 채취후 건토중량법으로 분석하였다(Klute, 1986).

토양화학성 분석은 농촌진흥청 농업기술연구소(1988)의 토양화학분석법에 준하여 분석하였다. 토양 pH는 토양과 증류수의 비율을 1:5로 희석하여 초자전극법으로 분석하였고 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 치환성 양이온인 K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺는 1N-NH₄OAc로 침출시켜 ICP(Perkin Elmer 3300)를 이용하여 분석하였다. 그 외 생육특성은 농촌진흥청 농사시험연구 조사기준에 준하여 조사하였다(농촌진흥청, 1995).

시험후 토양의 화학성(Table 1)은 퇴비단용구와 삼요소+퇴비구는 유기물의 함량이 일반 논토양 평균 수준보다 높고(정 등, 1998) 규산연용구는 칼슘의 집적으로 pH가 높은 경향이였으며, 그 차이는 표토보다 심토에서 높은 결과를 보였다.

토양의 물리성은 Table 2와 같다. 용적밀도는 퇴비시용구에서 낮은 경향을 보였고 공극율은 반대의 경향을 보였다.

Table 1. Chemical properties of soil from a long-term fertilizer application experiment^{a)}.

Soil layer (cm)	Treatments	pH (1:5)	O.M. (g kg ⁻¹)	Av. P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Ex. Cations (cmol ⁺ kg ⁻¹)		
					K	Ca	Mg
Surface (0-10)	No fertilizer	5.7	27.9	27	0.07	3.3	0.72
	Compost	5.7	32.3	71	0.32	3.8	0.80
	NPK	5.8	28.6	155	0.11	3.9	0.95
	NPK+silica	6.7	28.2	162	0.11	6.8	1.10
	NPK+compost	5.9	32.5	221	0.34	4.8	1.13
Subsurface (10-20)	No fertilizer	7.0	20.0	21	0.08	4.6	1.43
	Compost	7.4	19.2	25	0.29	5.2	1.65
	NPK	7.5	18.3	39	0.08	5.4	1.73
	NPK+silica	8.2	18.7	32	0.08	7.7	1.62
	NPK+compost	7.5	21.3	70	0.28	5.7	1.83

^{a)}The measurement was performed after harvest.

Table 2. Bulk density and three phases composition at different soil depths of paddy under different fertilizer application^{a)}.

Treatments	Soil depth (cm)	Bulk density (g cm ⁻³)	Three phases			Porosity
			Solid	Liquid	Gaseous	
		 (%)			
No fertilizer	0~5	1.29	48.8	46.0	5.2	51.2
	5~10	1.32	49.8	48.1	2.1	50.2
	10~15	1.42	53.5	39.5	7.0	46.5
	15~20	1.54	58.1	35.9	6.0	41.9
Compost	0~5	1.18	44.6	47.4	8.0	55.4
	5~10	1.14	42.9	43.8	13.3	57.1
	10~15	1.24	46.9	42.7	10.4	53.1
	15~20	1.42	53.5	41.0	5.6	46.5
NPK	0~5	1.23	46.3	52.4	1.3	53.7
	5~10	1.27	48.0	50.9	1.2	52.0
	10~15	1.40	52.7	44.1	3.1	47.3
	15~20	1.53	57.7	39.0	3.3	42.3
NPK+silica	0~5	1.20	45.1	43.1	11.8	54.9
	5~10	1.25	47.0	41.6	11.4	53.0
	10~15	1.31	49.4	43.4	7.3	50.6
	15~20	1.56	58.9	38.1	3.0	41.1
NPK+compost	0~5	1.07	40.3	52.3	7.4	59.7
	5~10	1.21	45.7	50.4	3.9	54.3
	10~15	1.26	47.6	47.8	4.6	52.4
	15~20	1.49	56.3	42.2	1.5	43.7

^{a)}The measurement was performed after harvest.

결과 및 고찰

지하부는 지상부의 생육특성과 밀접한 관계가 있다. 지상부의 초장, 경수 및 건물중은 시비량이 많을수록 높은 경향이였다. 그러나 뿌리 건물중은 삼요소구에 비하여 삼요소+퇴비, 퇴비단용구 및 삼요소+규산구가 많았으며, 총근장은 삼요소구에 비하여 무비, 퇴비단용구, 삼요소+퇴비구 순으로 길었다(Table 3). 또한 R/S율은 무비, 삼요소+퇴비, 퇴비, 삼요소+규산구 순으로 높아지는 경향이였다. Lafitte *et al.*(2001)도 R/S율은

0.05~0.2 범위로 품종간 차이를 보이며 비료 관리, 특히 퇴비 사용에 의해서 그 비율이 증가되는 것으로 보고하였다.

근장밀도와 근중밀도는 뿌리 생육의 중요한 지표이다. 根長密度는 단위 토양용적에 포함된 총 뿌리 길이로서 뿌리의 직경 등은 나타낼 수 없지만 면적당 총 뿌리의 길이를 추정하는데 이용된다(Kang *et al.*, 1994). 토양깊이별 根長密度를 비교하면 토심별 根系의 분포를 정량적으로 파악하는 것이 가능하다. 비료 및 퇴비장기 시용구의 株下와 株間下의 근장밀도를 깊이별로 나타낸 것이 Table 4이다. 토심 0~5 cm에서의 뿌리

Table 3. Growth characteristics of shoots and roots of rice grown under long-term fertilization plots^{a)}.

Treatments	Shoots			Roots ^{b)} , 0~20 cm		R/S ^{c)}
	Plant height (cm)	Tillers (no. hill ⁻¹)	Dry weight (g hill ⁻¹)	Length (m)	Dry weight (g)	
No fertilizer	76.2	8.5	20.3	156.6	2.511	0.124
Compost	87.3	11.0	28.6	153.9	2.727	0.095
NPK	89.9	11.5	29.4	119.6	2.524	0.086
NPK+silica	95.5	9.5	27.6	119.9	2.613	0.095
NPK+compost	96.7	12.5	30.1	152.6	3.165	0.105

^{a)} Root sample was performed by cylinder monolith method at heading stage.

^{b)} Mean of root length and weight at below hill and mid-point of four hills.

^{c)} R/S : Roots/Shoots dry weight.

분포는 삼요소구와 삼요소+규산구에 비하여 무비구, 삼요소+퇴비구, 퇴비단용구에서 높은 경향이였다. 한편 토심 5~10 cm에서의 뿌리분포는 퇴비단용구에서, 10 cm 이하에서도 퇴비단용구에서 가장 높았다.

根重密度는 根長密度와 유사한 개념으로 단위토양용적 당 총 뿌리의 무게(mg cm^{-3})로 나타낸다(Cheema *et al.*, 1979). 根重密度는 분지근의 무게가 너무 적어서 처리간의 차이를 나타내는 데 문제가 있으나 건물중 측정이 근장보다 상대적으로 용이하여 根系의 분포를 추정하는데 많이 사용되는 방법이다. 비료 및 퇴비 장기 시용구의 株下와 株間下の 근중밀도를 토심별로 나타낸 것이 Table 5이다. 근중밀도는 근장밀도와 달리 삼요소+퇴비구에서 가장 높은 경향을 보이고 있다. 전처리에서 株下가 株間下보다 높은 경향이였으나 퇴비단용구에서는 10 cm 이하의 토심에서는 株間下가 株下보다 높은 경향을 나타내었다.

비료 및 퇴비사용에 따른 株下와 株間下の 평균 근장밀도와 근중밀도를 나타낸 것이 Fig. 1이다. 평균 근장 밀도는 토심 0~5 cm에서는 무비, 삼요소+퇴비, 퇴비단용, 삼요소+규산, 삼요소의 순으로 높아지는 경향을 보였다. 그러나 토심 5~10 cm에서는 삼요소구에 비하여 퇴비단용구가, 토심 10 cm 이하에서는 무비 및 퇴비단용구가 높은 경향을 나타내었다. 뿌리가 토층속에서 쉽게 분포하기 위해서는 먼저 기계적 저항이

없어야 하고, 또한 충분한 양분이 공급되어야 된다. 무비구의 표토에 근장밀도가 높은 것은 심토에서는 물리적 저항이 크고 양분이 부족하여 관개수가 있는 상부에 밀집하여 성장한 것으로 판단된다. 평균근중밀도는 토심 0~5와 5~10 cm에서는 삼요소+퇴비구에서 가장 높았다.

근장을 근중으로 나눌 경우 근 직경이나 분지 정도 등과 같이 근형태의 지표(Kang *et al.*, 1994)로 이용할 수 있는 비근장을 산출할 수 있다. 무기질 비료 및 퇴비의 장기간 연용에 따른 출수기 비근장의 차이를 나타낸 것은 Fig. 2와 같다. 처리 모두 비근장은 株間下가 株下보다 높은 경향이였다. 株下の 비근장은 토심이 깊어질수록 높아지는 경향이였고 무비구에서 가장 높았고 삼요구+규산처리구에서 가장 낮았다. 이는 규산처리구에서 근의 직경이 굵어지고 직근성으로 신장함을 유추할 수 있다. 규산의 시용은 전 생육시기에 걸쳐 토양의 Eh를 높이고 그 편차를 크게 하여 벼 뿌리의 활력을 높이고 신장을 촉진하여 심근비를 증대시킨다는 보고가 있었다(김, 1986). 株間下の 무비구에서는 토심간 차이가 없었고 삼요소구와 삼요소+규산구에서는 토심 0~15 cm까지는 차이가 없었으나 토심 15 cm이하에서 급격히 길어지는 경향이였다. 삼요소+퇴비구와 퇴비단용구에서는 일정한 경향이 없었다.

뿌리 깊이 지수는 뿌리의 수직분포 정도를 나타낸다. 일반적으로 이 지수의 값이 적으면 천근성이고, 많으면 심근성인

Table 4. Root length density of rice at heading stage in long-term fertilization plots.

Soil depth (cm)	No fertilizer		Compost		NPK		NPK+silica		NPK+compost	
	BH ^{a)}	MH ^{b)}	BH	MH	BH	MH	BH	MH	BH	MH
..... (cm cm^{-3})										
0-5	7.84	8.92	7.76	6.33	6.26	5.02	7.18	5.35	8.98	6.98
5-10	4.52	4.36	4.47	6.09	3.52	3.47	3.57	3.94	5.06	3.96
10-15	3.96	2.98	3.03	3.50	3.28	2.31	2.79	2.01	3.96	2.59
15-20	1.68	1.19	1.07	2.58	1.32	1.88	1.16	1.14	1.42	1.61
Mean	4.50	4.36	4.08	4.63	3.60	3.17	3.67	3.11	4.85	3.78
SE ^{c)}	2.54	3.13	2.62	1.89	1.93	1.51	2.59	1.86	3.03	2.20

^{a)}BH : below hill, ^{b)}MH : mid-point of four adjacent hills, ^{c)}SE : standard error.

Table 5. Root weight density of rice at heading stage in long-term fertilization plots.

Soil depth (cm)	No fertilizer		Compost		NPK		NPK+silica		NPK+compost	
	BH ^{a)}	MH ^{b)}	BH	MH	BH	MH	BH	MH	BH	MH
..... (mg cm^{-3})										
0~5	1.61	1.18	1.80	1.01	1.60	0.96	1.89	1.00	2.03	1.23
5~10	0.85	0.62	1.00	0.80	0.89	0.67	0.97	0.78	1.16	1.10
10~15	0.58	0.44	0.51	0.53	0.63	0.51	0.56	0.38	0.69	0.39
15~20	0.25	0.15	0.20	0.32	0.24	0.21	0.18	0.15	0.25	0.32
Mean	0.82	0.60	0.88	0.66	0.84	0.59	0.90	0.58	1.03	0.76
SE ^{c)}	0.55	0.42	0.65	0.30	0.55	0.30	0.73	0.37	0.76	0.47

^{a)}BH : below hill, ^{b)}MH : mid-point of four adjacent hills, ^{c)}SE : standard error.

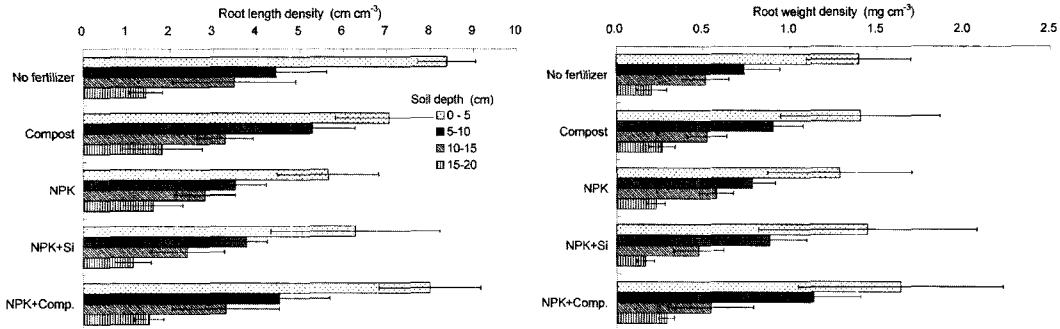


Fig. 1. Mean root length and weight density of rice grown under different fertilizer application. Root sampling was performed by cylinder monolith method at heading stage. The lines in the bars mean the standard errors.

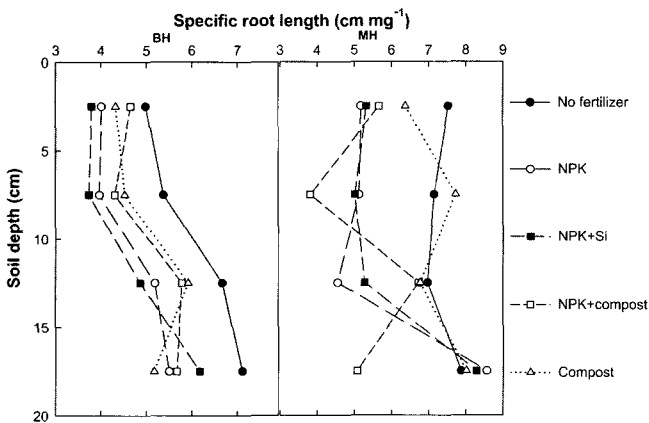


Fig. 2. Specific root length of rice as influenced by long-term fertilizer treatments. Root sampling was performed by cylinder monolith method at heading stage. BH and MH indicate below hill and mid-point of four adjacent hills respectively.

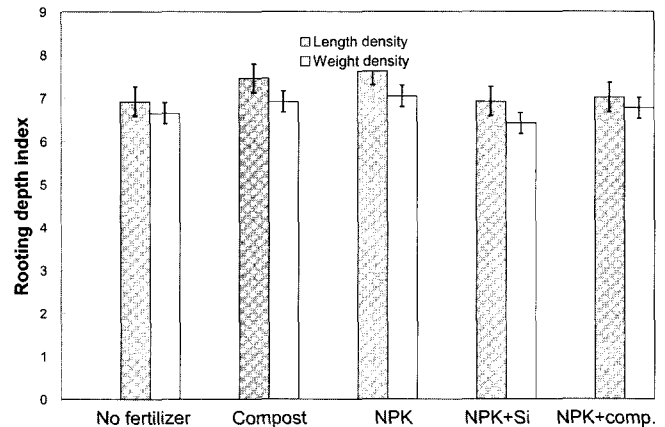


Fig. 3. Rooting depth index (RDI) of rice grown under different fertilizer application. Root sampling was performed by cylinder monolith method at heading stage (error bar = standard error). RDI was calculated by the equation “ $\sum\{\text{mean of each soil depth} \times (\text{mean length or weight density} / 100)\}$ ”.

것으로 볼 수 있다. 근장밀도로부터 계산된 뿌리 깊이 지수는 근중밀도로부터 계산된 깊이 지수보다 높은 경향이었으나 처리간에는 삼요소구와 퇴비단용구에서 높은 경향을 나타내었다 (Fig. 3). 삼요소구와 퇴비단용구가 심근의 분포비율이 높아서 뿌리 깊이 지수가 높은 경향이였다. 이는 장기간에 동일비료를 연용함에 따라서 토양의 이화학적 성이 지속적으로 변화된 결과로 근장으로 계산한 깊이 지수가 근중으로 계산한 깊이 지수보다 높았으나 경향은 동일하였다.

이상의 결과를 살펴보면 근장밀도와 근중밀도의 차이가 퇴비단용구의 5 cm 이하의 토심과 무비구의 0~5 cm에서의 근장밀도가 근중밀도보다 많은 이유는 이들 처리구에서 분지근이 많음에 기인된 것으로 사료되었다. 퇴비단용구의 분지근이 많은 이유는 長期間 퇴비사용으로 토양의 물리성이 개선(박 등, 1998; 류 등, 1988)된 것으로 생각되며, 무비구의 표토에 분지근이 많은 것은 長期間 비료 무사용으로 인한 물리적 악화과 토양의 양분결핍으로 비의 뿌리가 관계수의 양분을 흡수하기 위하여 표층으로 분포하는 것으로 생각되었다.

요 약

무기질 비료 및 퇴비를 36년간 長期 사용한 논 토양에서 벼 뿌리의 분포양상을 구명하기 위하여 무비, 퇴비단용, 삼요소, 삼요소+퇴비, 삼요소+규산구의 벼 뿌리 관련 특성을 조사하였다. 본 시험은 평택동에 화삼벼를 주당 3본씩 손이앙 하였으며 삼요소구의 시비량은 $N-P_2O_5-K_2O \text{ kg ha}^{-1} = 150-100-100$ 를 사용하였고 규산은 ha당 500 kg, 퇴비는 ha당 10,000 kg를 사용하였다. 근계특성 분포 특성을 요약하면 다음과 같다. 지상부의 건물중은 시비량이 많을수록 높은 경향이였다. 그러나 뿌리 건물중은 삼요소구에 비하여 삼요소+퇴비에서 많았으며, 총근장은 무비에서 컸다. 뿌리 건물중은 삼요소+퇴비구에서 높았다. 토심별 근장밀도(cm cm^{-3})는 무비구의 株間下 0~5 cm에서 가장 높았고 토심이 깊어질수록 적어지는 경향이였고 株下와 株間下의 차이는 심토로 갈수록 적어지는 경향이였으나 퇴비단용구는 토심 15~20 cm의 株間下에서 株下와 차

이가 컸다. 토심별 근중밀도(mg cm^{-3})는 삼요소+퇴비구에서 가장 높았다. 비근장은 삼요소+규산구에서 가장 낮았다. 뿌리 깊이 지수는 퇴비단용구가 높았으며 근장으로 계산한 지수가 근중으로 계산한 지수보다 높았다.

인용문헌

- Barley, K. P. 1970. The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. *Adv. Agron.* 17 : 159-201.
- Bohm W. 1979. Methods of studying root systems. Ecological Studies 33. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Cheema, S. S., U Chaudhri, and M. R. Chaudhary. 1979. Rooting pattern of three rice varieties. *Crop improvement* 6 : 58-62.
- Eissenstat D. M. 1992. Costs and benefits of constructing roots of small diameter. *J. Plant Nutr.* 15 : 763-782.
- Kang Si Yong, Bo Kyeong Kim, and Shigenori Morita. 2001. Leaf-stem cutting as a rapid method for characterizing rooting habit of rice cultivars. *Korean J. Breed.* 33(3) : 175-180.
- Kang, S. Y., S. Morita, and K. Yamazaki. 1994. Root growth and distribution in some japonica-indica hybrid and japonica rice cultivars under field conditions. *Korean Journal of Crop Science* 63(1) : 118~124.
- Klute, A. 1986. Methods of soil analysis " part II. physical and mineralogical methods Arner. Soc. Agron. Inc. Madison USA pp 1188.
- Lafitte, H. R., M. C. Champoux, G. McLaren and J. C. O'Toole. 2001. Rice root morphological traits are related to isozyme group and adaptation. *Field Crops Research* 71:57-70.
- Marsh, B.a'B. 1971. Measurement of length in random arrangements of lines. *J. Appl. Ecol.* 8:265-267.
- Morita, S and J. Abe. 1996. Root system architecture of rice plants based on formation of phytomers. Proceeding of the international symposium (Maximizing sustainable rice yields through improved soil and environmental management) Thailand.
- Newman, E. I and Andrews R. E. 1973. Uptake of phosphorus and potassium in relation to root growth and root density. *Plant and Soil* 38:49-69.
- Newman, E. I. 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.* 3:139-145.
- Oyanagi, A., T. Nakamoto and M. Wada. 1993. Relationships between root growth angle of seedlings and vertical distribution of roots in the field in wheat cultivars. *Japanese Journal of Crop Science* 62:565-570
- Smit A. L., A. G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin and S. C. van De Geijn. 2000. Root methods (A Handbook). Springer Berlin Heidelberg New York.
- Tennant, D. 1975. A test of a modified line interaction method of estimating root length. *J. of ecology.*
- Waisel Y., E. Amram and Kafkafi U. 1996. Plant roots(The hidden half). Marcel Dekker, New York.
- Wilhelm, W. W. 1998. Dry-matter partitioning and leaf area of winter wheat grown in a long-term fallow tillage comparisons in the US Central Great Plains. *Soil & Tillage Research* 49:40-56.
- 김한명. 1986. 질소와 토양개량제의 시용이 벼 뿌리의 발달과 활력 및 수량에 미치는 영향. 원광대학교 박사학위논문.
- 농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법. 농촌진흥청.
- 농촌진흥청. 1995. 농사시험연구조사기준.
- 류철현, 김종구, 박건호, 김성조. 1988. 논 토양의 이화학적 성질에 미치는 有機物의 連用效果 I. 有機物連用 畚의 토양화학성 변화연구. *韓土肥誌* 21(4) : 373-379.
- 박창영, 이재생, 손일수, 박기도, 정연태, 박경배, 최정. 1998. 논 토양에서 同一肥料 長期連用에 따른 土壤斷面 형태 및 土質力學性 특성 변화. *농업과학논문집* 40(2) : 11-17.
- 森田茂紀, 岩淵輝, 山崎耕字. 1986. 水稻1次根の伸長方向と根重との關係. *日昨紀* 52 : 520-525.
- 신진철. 1988. 수도품종들의 뿌리의 토층분포와 지상부 생육과의 관계. 서울대학교 박사학위 논문.
- 장재기, 김호영, 여운상, 임상중, 이기영, 최해춘, 김순철, 손재근. 1999. 벼 담수직파 재배에서 도복저항성에 대한 품종간 차이 및 요인분석. *한작지* 31(3) : 232-238.
- 전원태. 2001. Minirhizotron을 이용한 뿌리 관찰 방법. 농촌진흥청. 연구와 지도 42(9) : 16-18
- 정병간, 조국현, 윤을수, 윤정희, 김유학. 1998. 우리나라 논토양의 화학적 특성 분석. *한토비지* 31(3) : 246-252
- 川田信一郎, 丸山辛夫, 副島増夫. 1977. 水稻における根群の形態形成について `とくに窒素施用量を変更した場合の一例. *日本作物學會.* 46 : 193-198.