

밭전환 논에서 심토파쇄에 따른 사료용옥수수의 수량성 변화

서종호[†] · 백성범 · 권영업 · 김충국 · 정광호 · 정건호 · 이재은 · 손범영 · 김시주

농촌진흥청 국립식량과학원

Effect of Subsoiling on Silage Maize Yield in Paddy Field Converted to Upland Condition

Jong-Ho Seo[†], Sung-Beom Back, Young-Up Kwon, Chung-Guk Kim, Kwang-Ho Jung, Gun-Ho Jung, Jae-Eun Lee and Beom-Young Son, and Si-Ju Kim

National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea

ABSTRACT Low silage corn yield due to bad soil physical properties in the paddy field converted to upland condition is the chief obstacles to expanding the area for silage maize production. The effect of subsoiling (subsoiling to depth 40 cm) on soil physical properties and silage corn yield were investigated in the first year of paddy field converted to upland condition in 2010 and 2011, respectively. Soil compaction was loosened much particularly at depth 25~35cm as much as 1~1.5 MPa and soil bulk density and porosity at depth 15~30 cm are improved by subsoiling. Maize growth was increased by subsoiling, particularly in kernel number per ear which increased ear weight. Total digestible nutrients (TDN) yield of silage maize was increased as much as 19 and 39% in 2010 and 2011, respectively showing that yield increase according to subsoiling was higher when maize growth was prohibited much by excess-moisture injury due to heavy rain in 2011.

Keywords : paddy field, subsoiling, silage maize, yield, soil physical properties

국제 곡물가의 폭등에 따른 농후사료의 가격 상승에 대응하여 조사료와 배합사료의 비율을 5.5 : 4.5로 반추가축의 사료급여 비율의 개선을 위해 국내 조사료 생산성 증대가 요구된다. 현재 정부는 청보리 및 옥수수 등 양질조사료의 국내 증산을 위한 추진하는 등 2014년까지 사료작물의 자급률을 90%까지 증가시키고자 하는데, 특히 국민 쌀 소비량의 지속적 감소됨에 따라 논에서 벼 재배를 줄이고 사료

용 옥수수, 수단그라스 등 조사료 작물의 재배를 장려하고 있다. 그에 따라 사료용 옥수수의 재배면적을 현재의 11천 ha에서 2014년에 40천 ha까지 증가시키고자 하는데, 현재 논 재배면적은 1,443 ha(2011)에 불과하여 논에서의 재배확대가 절실한 실정이다.

옥수수의 논 재배면적이 증가하지 않는 이유는 배수가 불량하고, 토양물리성, 도복의 발생이 증가하는 등 재배 토양 환경이 불량하여 밭에 비해서 논에서의 수확량이 낮기 때문이다(밭 대비 평균 68% 수준). 특히 배수가 양호한 논 조건 일지라도 논을 밭으로 전환한 첫 해에는 담수에 따른 토양 환원 및 벼 재배를 위한 경운 및 로타리 작업으로 인해 논 의 심토에 경반층이 형성되어 토양 통기성 및 배수성 등 토양 물리성이 악화되어(Kim *et al.*, 1991 ; Nakano, 1978) 옥수수 뿌리가 생육하기 위한 환경이 불량하고 양분흡수가 어려워 옥수수의 수량이 약 50% 가까이 감소한다.

논에 재배되는 옥수수는 토양 물리성의 영향을 많이 받아 벼 재배 후 논으로 환원했을 때 전환기간에 장기간에 걸쳐 계속적으로 수량이 증가하는 패턴을 보인다. Aota & Hoshino (1978)은 저습중점(低濕重粘) 논토양을 밭으로 전환하여 5년간 연속적으로 옥수수를 심었을 때 초년도의 옥수수 수량은 5년차의 50% 정도로 현저히 낮았고, 그 후 전환년차 증가에 따라 수량이 5년차까지 계속 증가하였다고 한다. Seo & Kim(2005)도 논에서 밭전환년차의 증가에 따라 3년까지 수량이 뚜렷하게 증가하였고, 전환 1년차의 수량은 전환 3년차의 58%(ha당 건물수량 10톤, 밭의 정상 건물수량 - ha당 20톤의 약 50%)를 보였고, 전환 2년차는 전환 3년차의

[†]Corresponding author: (Phone) +82-31-290-6763 (E-mail) sseo@korea.kr

<Received 20 June, 2012; Revised 24 October, 2012; Accepted 23 November, 2012>

82 %를 보였다고 하였다.

발전환 연차의 증가와 더불어 토양 상층부로부터 물리성이 개선되면서 그에 비례하여 옥수수 수량이 증가하지만 발전환 논 토양특성 및 년차간 옥수수 수량 변화에 대해 모르는 농민은 논에서 첫 재배 시 옥수수의 수량이 대폭적으로 감소하기 때문에 경제성이 없는 것으로 판단하고 옥수수 재배를 포기하는 경우가 많다. 따라서 옥수수의 전환 1년차 뿐만 아니라 지속적인 옥수수 수량증대를 위해서는 전환 1년차에 인위적인 토양 물리성, 특히 토양 심층의 물리성 개량을 위한 경운기술의 도입이 필요하다.

논의 토양개량을 위한 경운방법으로는 심경과 심토파쇄를 들 수 있다. 심경은 논에서 쟁기로 대략 20 cm 정도의 깊이까지의 경운할 수 있지만 논의 20 cm 이하의 심토를 개량할 수가 없고, 특히 20 cm 이하에 형성되어 있는 경반층을 부수는 것이 어려워 물리성의 개선효과가 다소 떨어진다고 할 수 있다. 그에 반해 심토파쇄는 심경이 불가능한 40 cm 깊이까지의 토양을 파쇄하면서 경반층을 깨고, 파쇄공을 만들어 줄 수 있어 전환 초부터 투수성 및 통기성 제고를 통한 토양 물리성 개선효과가 뛰어나다. 옥수수 뿌리는 토양의 물리성에 영향을 크게 받는데, 심토파쇄는 작물의 뿌리를 하층토까지 전개시키는 효과가 있으며(Izumi *et al.*, 2009), 수분의 이용효율을 증진시키며(Chaudhary *et al.*, 1985), 질소 등의 양분이용효율을 증진시켜(Lipiec & Stepniewski, 1995) 옥수수에 대한 수량 증대 효과가 크다고 한다(Camp *et al.*, 1984; Hunt *et al.*, 2004).

논의 토양 하층토 개량을 위한 심토파쇄의 효과가 좋다는 사실은 알고 있었지만 지금까지는 심토파쇄를 실용적으로 할 수 있는 기종이 없었다. 기존의 견인식 심토파쇄기는 진동 없이 심토파쇄기를 견인하여 대형트랙터 트랙터가 필요하고, 심토파쇄 효과도 뛰어나지 않았지만, 최근에 개발된 트랙터부착 진동식 심토파쇄기는 트랙터의 동력전달장치와 연결된 진동장치를 추가로 설치하여 20~50 마력 정도의

중소형 트랙터로도 쉽게 40 cm 깊이까지의 토양을 깎 수 있다.

따라서 본 시험에서는 논 토양의 발전환 초년도부터 토양물리성의 악화에 의한 감소하는 옥수수 생육을 논 토양의 발전환 1년차부터 증진시키기 위해 심토파쇄에 의한 토양의 물리성의 변화 및 옥수수의 수량의 변화를 살펴봄으로 논 토양의 사료용 옥수수의 생산증대를 위한 경운법 개발을 위해 본 시험을 실시하였다.

재료 및 방법

경운처리

본 시험은 2010년 및 2011년 2년에 걸쳐 수원 국립식량과학원 논 시험포장에서 계속적으로 벼를 재배하였던 발전환 1년차 논을 대상으로 2년간 각각 실시하였다. 2010년 및 2011년 경운처리포장은 서로 인접하였는데, 2010년의 발전환 1년차 포장에서 옥수수를 재배할 때 2011년의 발전환 1년차 포장은 2010년에 벼를 재배하였다. 옥수수 파종전 경운으로 로타리 및 심토파쇄+로타리 두 처리를 두었고, 난괴법 4반복으로 하였다. 시험구(경운처리) 면적은 80 m²(8×10 m)이었다. 심토파쇄는 파종 전 10일 전에 실시하였고, 로타리 경운은 정지작업으로 옥수수 파종직전에 하였다.

시험된 사용된 심토파쇄기는 동명농기계(수원시 서둔동 소재)가 자체 개발한 상하좌우 진동식(진동축 회전식, 모델 DM-5, 4날식)을 이용하였다(Fig. 1). 심토파쇄 작업 시 파쇄 깊이를 40 cm로 조정하였다. 심토파쇄의 작업시간은 10a 당 30분 내외가 소요되었다.

옥수수 조사

옥수수 품종은 광평옥이었는데, 파종기는 2010년은 5월 12일, 2011년은 5월 18일이었다. 옥수수의 재식밀도 66,667 주 ha⁻¹(재식거리 75×20 cm)로 2립씩 파종하여 3~4엽기에



(a) Spindle for vibration



(b) Subsoiling blade



(c) Subsoiling before planting

Fig. 1. Vibration-type subsoiler used in experiment.

1주에 1본만 남기고 솎아 주었다. 옥수수의 초기 제초는 파종 시 토양처리제 알라클로르 입제를 살포하여 발아를 억제하였으며, 생육중기에 발생하는 잡초는 손으로 제초하였다. 옥수수에 대한 전체 시비량은 N-P₂O₅-K₂O = 18-3-3.4 kg 10a⁻¹로, 기비로 N-P₂O₅-K₂O = 3-3-3.4 kg 10a⁻¹을 사용하고 질소 추비는 파종 후 5~6엽기에 15 kg 10a⁻¹를 사용하였다.

출사 후에 간장, 착수고, 간경 등 식물체 생육을 조사하였다. 수확은 생리적 성숙기(8월 하순)에 하였는데, 8 m²(4×2 m)면적 안에 있는 개체의 전 식물체를 수확하여 주수, 이삭수를 조사하고 전식물체의 생체중을 측정하고, 이삭을 분리하여 이삭중을 측정하였다. 이삭중 측정 후 이삭의 길이, 폭 및 립수를 조사하였다. 평균적인 이삭 10개체, 간엽 3개체의 샘플을 채취하여 간엽은 절단 후 건조기에서 5일 건조하여(70℃) 건물중을 측정하였다. 옥수수 Total Digestible Nutrients 수량은 Pioneer Hi-bred사가 제시한 TDN(Total Digestible Nutrients) = (간엽건물중 × 0.582) + (암이삭 건물중 × 0.85)의 식에 의하여 계산하였다(Holland *et al.*, 1990).

옥수수 재배기간 동안의 평균기온과 강수량은 Table 1에 나타내었는데, 옥수수의 생육 시 평균기온은 2010년 및 2011년 모두 예년과 편차는 다소 있지만 대체적으로 비슷하게 유지되었다. 그러나 옥수수 재배기간의 강수량은 년차간 변이가 심하여 2010년은 예년보다 조금 감소하였지만(796 mm) 2011년은 예년에 비해 현저히 높아(특히 6, 7월) 평년에 비해 약 2배 높은 값(1,575 mm)을 나타내었다. 그에 따라 옥수수가 심한 습해를 받았고, 생육이 현저히 저하되었다.

토양 물리성 조사

옥수수의 수확 후 토양 심층의 물리성을 조사하였는데, 처리별 토양을 4 m²(2×2 m) 넓이로 깊이 50 cm까지 파서 토양경도는 표토부터 토심 40 cm까지 5 cm 간격으로 4반복으로 조사하였다. 토양경도계는 푸쉬콘 토양경도계(DIK-5553, 일본 Daiki사)를 이용하였다. 하층토(15~30 cm)의 토양의

용적밀도 및 공극율을 조사하였는데, 지름 7.3 cm, 길이 7.6 cm (318 cm³)의 코어를 사용하여 토심 15~30 cm의 가운데 부분을 교란없이 채취하여 105℃에서 건조하여 용적밀도 및 공극율을 조사하였다. 용적밀도 조사는 시험구당 3반복으로 조사하였다.

결과 및 고찰

토양 물리성 변화

Fig. 2는 발전환 1년차 논외의 로타리 구와 심토파쇄+로타리 구의 옥수수 수확 후 토양 경도의 변화를 나타낸 것이다. 로타리 구 및 심토파쇄+로타리 구 모두 로타리 경운이 이루어졌기 때문에 토양 15 cm까지는 모두 토양경도가 1 MPa 이하로 낮았다. 로타리 구에서 2010년의 토양이 2011년보다 심층의 경도가 다소 높았는데, 2년 모두 경운이 이루어지지 않았던 토양깊이 20 cm에서 40 cm까지는 현저히 경도가 증가하였다. 특히 깊이 25~35 cm에서 토양경도가 3~3.5 MPa로 현저히 증가하였다.

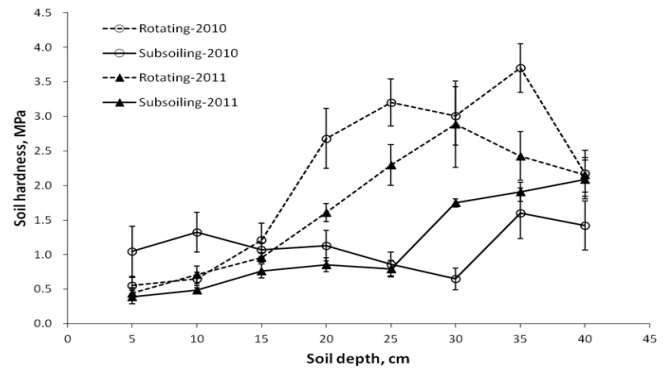


Fig. 2. Changes of soil hardness over soil depth 0~40 cm according to tillage methods (Year 2010 and 2011, Suwon).

Table 1. Mean air temperature and precipitation during growing season in Suwon city in 2010 and 2011, and 30-yr mean.

Month	Air temperature			Precipitation		
	2010	2011	30-yr mean	2010	2011	30-yr mean
	----- °C -----			----- mm -----		
May	17.1	16.2	17.2	100.7	74.2	97.8
Jun.	23.1	21.1	21.7	116.1	391.5	129.2
Jul.	26.0	25.3	24.8	206.8	794.3	351.1
Aug.	26.9	26.1	25.6	372.8	315.1	299.8
Total	-	-	-	796.4	1,575.1	877.9

그에 반해 심토파쇄+로타리 구는 심토파쇄에 의해 하층 토의 토양경도가 많이 감소하였다. 깊이 25 cm까지 2년 모두 1 MPa 이하를 나타내었다. 30 cm 이하에서는 다소 경도가 증가하여 2011년 토양에서 약 2 MPa까지 증가하였지만 로타리 구에 비해 1~1.5 MPa 가량 낮았다. 따라서 심토파쇄에 의해 토양경도는 토층 20~35 cm의 심층의 경도를 감소시켜 옥수수의 뿌리가 깊게 뻗어 갈 수 있는 여건을 형성하는 것으로 나타났다.

로타리가 경운할 수 없는 토양 15~30 cm 층위의 용적밀도 및 삼상비율을 보면(Table 2), 2010 년의 심토파쇄+로타리 구의 용적밀도가 1.43 g cm⁻³으로 로타리구보다 0.19 g cm⁻³ 감소하였고, 공극율은 46.1 %로 로타리구보다 7.2%가 증가하였고, 그에 따라 토양의 고상의 비율이 53.9%로 로타리 구보다 7.2%가 감소하여 토양의 물리성이 현저히 좋아지는 것을 알 수 있었다. 2011년도 2010년과 마찬가지로 심토파쇄에 의해 토층 15~30 cm의 토양물리성이 좋아졌는데, 심토파쇄+로타리 구의 용적밀도가 1.63 g cm⁻³으로 로타리 구

보다 0.14 g cm⁻³ 감소하였고, 공극율은 38.0%로 5.1%가 증가하였고, 그에 따라 토양의 고상의 비율이 62.0%로 5.0%가 감소하였다.

Chaudhary *et al.*(1995)는 심토파쇄에 의한 토양경도 및 공극율의 증가에 따라 옥수수 뿌리가 하층토에서 크게 발달되었다고 하였는데, 15~35 cm의 하층토에서의 경도 감소 및 공극율 증가 등 물리성의 개선은 옥수수의 근권을 확대시킬 것으로 보였다.

옥수수 생육 및 수량

Raghavan *et al.*(1978) 및 Nevens & Reheul(2003)은 경도가 높은 과밀된 토양에서 심토파쇄에 의한 옥수수의 생육 단계의 빠른 진전, 생육 및 수량의 증가를 보고한 바 있는데, 출사기에 조사한 식물체의 생육 상황 및 생리적 성숙기에 조사한 이삭의 상태를 보면, 2010년도의 심토파쇄+로타리 구의 옥수수 간장이 281 cm로 로타리구에 비해 각각 26 cm 증가하여 로타리구보다 생육이 많이 좋아진 것을 알 수 있었다.

Table 2. Change of soil bulk density affected by tillage method at soil depth 15~30 cm.

Year	Tillage	Bulk density	Porosity	Three phase of soil		
				Solid	Liquid	Aerial
		g cm ⁻³	----- % -----			
2010	RT [†]	1.62	38.9	61.1	36.6	2.3
	SS [‡] +RT	1.43	46.1	53.9	29.4	16.8
	LSD0.05	0.11	4.1	4.1	2.8	6.6
2011	RT [†]	1.77	32.9	67.0	10.4	22.5
	SS [‡] +RT	1.63	38.0	62.0	25.0	13.3
	LSD0.05	0.13	4.3	4.3	6.0	ns

[†]RT : Rotating, [‡]SS : Subsoiling.

Table 3. Silage corn growth affected by tillage method before planting in 2010 and 2011.

Year	Tillage	Silkingday	Stalk height	Stem diameter	EHR [↓]	Ear length	Ear diameter	Kernal per ear
		day	cm	mm	%	cm	cm	ea
2010	RT [†]	73.5	255	21.6	48	16.1	4.8	480
	SS [‡] +RT	72.5	281	23.7	51	17.3	4.8	544
	LSD0.05	ns	9	1.6	2	1.0	ns	51
2011	RT [†]	74.7	178	18.9	42.2	12.0	4.1	296
	SS [‡] +RT	73.8	204	20.4	43.7	12.7	4.4	366
	LSD0.05	0.7	7	0.8	ns	ns	0.2	45

[†]RT : Rotating, [‡]SS : Subsoiling

[↓]Ear height ratio : ear height ÷ stalk height × 100

Table 4. Silage corn yield affected by tillage method before planting in 2010 and 2011.

Year	Tillage	Ear dry matter	Stover dry matter	Total dry matter	Total digestible nutrients	
					Yield	Index
----- Mg ha ⁻¹ -----						
2010	RT [†]	7.74	7.63	15.37	11.02	100
	SS [‡] +RT	9.31	8.94	18.25	13.12	119
	LSD0.05	0.93	1.27	1.96	1.46	-
2011	RT [†]	3.37	2.57	5.93	4.35	100
	SS [‡] +RT	4.70	3.52	8.21	6.04	139
	LSD0.05	0.77	0.51	1.18	0.89	-

[†]RT : Rotating, [‡]SS : Subsoiling.

간경도 심토파쇄에 의해 2.1 mm가 증가하였다. 이삭의 상태를 보면 심토파쇄+로타리 구의 이삭 길이가 17.3 cm로 로타리 구보다 1.2 cm 증가하였다. 특히 이삭당 립수가 심토파쇄+로타리 구가 로타리 구보다 41 개가 증가하였다.

2011년도는 생육기에 많은 강우로 인한 습해로 옥수수의 생육이 전반적으로 2010년보다 현저히 감소하였다. 2010년과 같이 심토파쇄+로타리 구에서 옥수수의 생육이 많이 증가하였는데, 옥수수 간장이 심토파쇄+로타리 구가 204 cm로 로타리 구에 비해 각각 26 cm 증가하였다. 간경도 1.5 mm 증가하였다. 이삭에서는 이삭두께가 심토파쇄에 의해 0.3 cm 증가하였고 이삭당 립수는 약 70개가 증가하였다. 따라서 심토파쇄를 추가로 실시할 경우 간엽 및 이삭이 전반적으로 증가하는 것으로 나타났고, 특히 이삭에서는 이삭당 립수가 증가하여 이삭중을 증대시킬 수 있을 것으로 보였다.

수확기의 경운처리별 사료용 옥수수의 수량의 변화를 보면, 로타리 구에 비해 심토파쇄+로타리 구의 생육이 증가됨에 따라 옥수수 이삭 및 간엽의 수량이 증가하였다. 2010년 심토파쇄+로타리 구의 이삭건물중이 9.31 Mg ha⁻¹로 로타리구의 7.74 Mg ha⁻¹ 보다 1.57 Mg ha⁻¹ 증가하였다. 간엽중은 심토파쇄+로타리 구가 8.94 Mg ha⁻¹로 로타리구의 7.63 Mg ha⁻¹ 보다 1.31 Mg ha⁻¹ 가 증가하였다. 2011년의 심토파쇄+로타리 구의 이삭건물중이 4.7 Mg ha⁻¹로 로타리 구의 3.37 Mg ha⁻¹ 보다 1.33 Mg ha⁻¹ 증가하였다. 간엽중은 심토파쇄+로타리 구가 3.52 Mg ha⁻¹로 로타리 구의 2.57 Mg ha⁻¹ 보다 0.95 Mg ha⁻¹가 증가하였다. Aota & Hoshino (1978) 발전환 1년차 논에서 옥수수 이삭중이 간엽중보다 많이 감소하였다고 하였다. 심토파쇄에 의해 토양 물리성이 개선되면 생육이 촉진되면 이삭중이 증가할 것으로 예상되는데, 2010년 및 2011년 모두 이삭부분의 건물중이 심토파

쇄에 의해 많이 증가하는 것으로 나타났다.

전건물중은 2010년 심토파쇄+로타리 구가 18.25 Mg ha⁻¹로 로타리 구의 15.37 Mg ha⁻¹ 보다 2.88 Mg ha⁻¹ 증가하였다. 2011년은 심토파쇄+로타리 구가 8.21 Mg ha⁻¹로 로타리 구의 5.93 Mg ha⁻¹ 보다 2.28 Mg ha⁻¹ 증가하였다. TDN 수량은 2010년 심토파쇄+로타리 구가 13.12 Mg ha⁻¹로 로타리구의 11.02 Mg ha⁻¹ 보다 2.1 Mg ha⁻¹ 증가하였다. 2011년은 심토파쇄+로타리 구가 6.04 Mg ha⁻¹로 로타리 구의 4.35 Mg ha⁻¹ 보다 1.69 Mg ha⁻¹ 증가하였다. 심토파쇄 경운을 추가했을 때의 로타리 경우에 대한 TDN 수량의 증가는 2010년이 19%, 2011년이 39%를 나타내어 습해로 인해 생육이 낮았던 2011년이 심토파쇄에 의한 옥수수 사료 수량이 증가하는데 특히 효과가 높은 것으로 나타났다. 발전환 1년차에서의 논에서의 이러한 심토파쇄에 의한 토양 하층토의 물리성 개선은 전환 2년차에서의 논발상태를 더욱 빨리 진전시킴에 의해 2~3년차에서의 옥수수 수량의 증대도 촉진시킬 것으로 보인다.

적 요

발전환 1년차 논발상태의 토양물리성 악화를 개선하고 사료용 옥수수 생육을 증진시키기 위한 심토파쇄의 효과를 살펴본 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 심토파쇄에 의해 토심 25~35 cm 층위의 토양의 경도가 크게 감소하였고 토층 15~30 cm에서 가밀도, 공극율 및 고상비율 등 하층토의 토양물리성이 개선되는 것으로 나타났다.
2. 심토파쇄 추가 시 옥수수의 간엽 및 이삭의 생육이 크게 증가하였으며, 특히 이삭당 립수의 증가가 이삭중

을 크게 증가시키는 것으로 나타났다.

3. 심토파쇄 추가 시 옥수수는 이삭 및 간엽의 수량증가에 의해 TDN 수량이 19~39% 증가하였으며, 특히 습해에 의해 생육이 불량한 2011년도의 옥수수의 생육 촉진 효과가 컸다.

인용문헌

- Aota, S. and M. Hoshino. 1978. Yearly variation of corn yield by conversion from paddy field of ill-drained clayey soil into upland field. *J. Japan Grassl. Sci.* 24 : 118-122.
- Camp, C. R., G. D. Christenbury, and C. W. Doty. 1984. Tillage effects on crop yield in Coastal plain soils. *Trans. Am. Soc. Ag. Eng.* 27 : 1729-1733.
- Chaudhary, M. R., P. R. Gajri, S. S. Prihar, and Romesh Khera. 1985. Effect of deep tillage on soil physical properties and maize yields on coarse textured soils. *Soil & Tillage Research.* 6 : 31-44.
- Holland, C., W. Kezar, W. P. Kautz, E. J. Lazowski, W. C. Mahanna and R. Reinhart. 1990. The pioneer forage manual - a nutrition guide. Pioneer Hi-Bres Int. Inc., Des Moines, IA.
- Hunt, P. G., P. J. Bauer, T. A. Matheny, and W. J. Busscher, 2004. Crop yield and nitrogen accumulation response to tillage of a Coastal Plain soil. *Crop Sci.* 44 : 1673-1681.
- Izumi, Y., T. Yoshida, and M. Iijima. 2009. Effect of subsoiling to the non-tilled field of wheat-soybean rotation on the root system development, water uptake, and yield. *Plant Prod. Sci.* 12(3) : 327-335.
- Kim, L. Y., I. S. Jo, K. T. Um, and H. S. Min. 1991. Changes of soil characteristics and crop productivity by the paddy-upland rotation system. 1. Changes of soil physical properties. *Res. Rept. RDA(S&F)* 32(2) : 1-7.
- Lipiec, J. and W. Stepniewski. 1995. Effect of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil & Tillage Research.* 35 : 37-52.
- Nakano, K. 1978. Changes in soil physical properties of clayey soil by conversion from ill-drained paddy field into upland field. *Bull. Hokuriku Natl. Agric. Exp. stn.* 21 : 63-94.
- Nevens, F. and D. Reheul. 2003. The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. *Soil & Tillage Research.* 70 : 175-184.
- Raghavan, G. S. V., E. McKyes, G. Gendron, B. Borglum, and H. H. Le. 1978. Effects of soil compaction on development and yield of corn (maize). *Can. J. Plant Sci.* 58 : 435-443.
- Seo, J. H. and S. D. Kim. 2005. Changes of soil nitrogen supply and production of upland forage crops by cattle manure during conversion from paddy to upland condition in paddy field. *Korean J. Crop. Sci.* 50(6) : 387-393.