Effect of Subsoil Breaking on Improvement of Soil Physical Properties in Agricultural Land

Yong-Seon Zhang, Dong-Jin Kim*, Kang-Ho Jung, Hee-Rae Cho, Kyung-Hwa Han, and Hyub-Sung Lee

Division of Soil and Fertilizer, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: gimdj@korea.kr

ABSTRACT

Received: April 24, 2019

Revised: May 14, 2019

Accepted: May 27, 2019

ORCID

Dong-Jin Kim

<https://orcid.org/0000-0001-5828-6732>

When the hardpan is formed in the soil, crop productivity reduces due to inhibition of crop root growth, water permeability, and capillary rise, for that reason, improvement of soil physical properties is needed. Therefore, this study investigated the soil physical properties after application of various subsoil breaking method to agricultural lands to establish the effect of improving soil physical properties by subsoil breaking. The penetration resistance of the soils treated with spading (in Wanju), aeration (in Sancheong), and deep plowing (in Namwon) was lower than that of the control soil treated with conventional plowing. However, the penetration resistance of the soils treated with excavation (in Andong) and towing (in Chungju) was higher than that of the control soil. The effect of improving the soil physical properties such as increasing effective soil depth, decreasing bulk density, and increasing permeability observed in the soil subjected to spading, aeration, and deep plowing. Although, in soil treated with excavation and towing methods, it was found that the physical properties such as increasing bulk density and decreasing permeability were deteriorated due to re-compaction such as the formation of a platy structure on the topsoil by using unsuitable agricultural machinery after subsoil breaking. Therefore, the subsoil breaking cycle should be decided depending on the presence or absence of the soil hardpan in consideration of soil management histories, such as the soil moisture condition and the type and use period of agricultural machinery after subsoil breaking.

Keywords: Conventional plowing, Infiltration rate, Penetration resistance, Soil physical property, Subsoil breaking

Infiltration rate on the plow pan as affected by different subsoil breaking method.

Plot ID [†]	Treatment	Infiltration rate (cm hr ⁻¹)	Infiltration class (Donahue et al., 1977)
WJ-SP	Pan-breaking to 50 cm depth with spading machine	2.5	Moderate
WJ-CP	Conventional plowing to 15 cm depth	2.0	Moderate
SC-AR	Pan-breaking to 50 cm depth with air-pressure pan-breaker	98.2	Very rapid
SC-CP	Conventional plowing to 15 cm depth	4.1	Moderately rapid
AD-EX	Pan-breaking to 100 cm depth with excavator	0.6	Moderately slow
AD-CP	Conventional plowing to 15 cm depth	1.4	Moderately slow
NW-DP	Pan-breaking to 30 cm depth with deep plow	8.7	Moderately rapid
NW-CP	Conventional plowing to 15 cm depth	2.0	Moderate
CJ-TW	Pan-breaking to 50 cm with towed pan-breaker	17.6	Rapid
CJ-TW	Conventional plowing to 15 cm depth	64.5	Very rapid

[†] WJ-SP, spading in Wanju-gun; WJ-CP, conventional plowing in Wanju-gun; SC-AR, aeration in Sancheong-gun; SC-CP, conventional plowing in Sancheong-gun; AD-EX, excavation in Andong-si; AD-CP, conventional plowing in Andong-si; NW-DP, deep plowing in Namwon-si; NW-CP, conventional plowing in Namwon-si; CJ-TW, towing in Chungju-si; CJ-CP, conventional plowing in Chungju-si.

Introduction

토양의 반층(hardpan)은 단단하게 굳어진 토층으로 용적밀도가 높고 유기물 함량이 낮은 광물질의 단단한 층을 의미한다. 토양에 반층이 형성되면 식물 뿌리의 관통, 물의 침투, 모세관 상승 등을 방해하기 때문에 작물 생산력 감소의 주요한 원인이다 (Grossman and Carlisle, 1969; Steele et al., 1969). 토양 반층은 토양 생성과정에서 형성되는 경우와 토지이용 측면의 인위적인 경우를 구별할 필요가 있다. 토양 생성과정 중 반층이 형성된 토양은 우리나라 405개 토양통 중에서 주로 대지, 저구릉지 및 구릉지 하부에 분포하는 부곡통, 포곡통, 연곡통, 장원통, 강릉통이며, 이러한 반층은 점토의 하향이동 집적이 주요 요인이다 (NIAST, 2000). 농경지에서 인위적 토양 다짐이 형성되는 경로는 기존 토양에 새로운 토양을 성토 또는 적토하는 과정에서 대형 차량의 차륜에 의한 다짐, 농기계의 대형화, 연속적인 동일 깊이의 연속적 경운 등이 보고되고 있다 (Kok et al., 1996). Schäffer et al. (2007)는 콤팩트 10번 주행 후 공극 연결성과 대공극률이 감소되어 포화 수리전도도에 영향을 주는 것으로 보고하였다. 작물 및 과수 뿌리 생육과 토양 관입저항의 역학 관계에서 1.0 MPa까지는 뿌리생육에 문제가 없으나 1.0 - 1.5 MPa 부터는 토양의 저항으로 뿌리 신장이 제한되기 시작하여 2.0 - 2.5 MPa 이상에서는 뿌리 생육이 거의 불가능한 것으로 보고되었다 (Taylor and Gardner, 1963; Ehlers et al., 1983; Sojka et al., 1990). 사과 과수원에서 경반층이 토양깊이 40 cm 이내에서 나타날 때 사과 수량이 약 36% 감소하며 (Kim and Jo, 1998), Raghavan et al. (1979)은 농기계 사용에 따른 토양다짐은 옥수수 수확량을 30 - 50%까지 감소시킨다고 보고하였다. 이러한 토양 반층 또는 다짐층 파쇄로 작물이 뿌리 뻗을 수 있는 근권을 확대하기 위하여 삽질식 쟁기 (크랭크 로타리), 폭기식 심토파쇄기, 굴삭기, 심경 쟁기, 견인식 심토파쇄기 등이 활용되고 있다. 특히 굴삭기는 연근이나 마 재배지에서, 폭기식 심토파쇄기는 과수원에서, 기타 장비는 논, 밭 및 시설재배지에서 경작 상황에 따라 다양한 기종이 사용되고 있다. 석비레 성토 밭에서 굴삭기와 삽질식 쟁기로 50 cm까지 심토파쇄시 당근 수량이 관행구보다 1.3배 증가하였고 (Zhang et al., 2015), 블루그라스 등의 목초류는 뿌리밀도가 높아 다른 작물보다 물리성 개선능력이 높다고 알려져 있다 (Kay, 1990). 또한 다짐으로 물리성이 악화된 밭토양에 심토파쇄, 심경, 사질토 객토, 거친 유기물 혼입 등의 개선방법이 제안되고 있다 (Kim et al., 2001). 심토파쇄로 작물생육을 위한 유효토심은 확대할 수 있으나 농작업 등에 농기계 사용이 증가하면서 농기계 하중 및 차륜 형태, 토양의 토성 및 구조 등 토양 다짐을 유발할 수 있는 요인이 다양하여 심토파쇄 주기 설정이 주요 관심사이다. 따라서 본 연구에서는 심토파쇄에 따른 물리성 개선 효과를 구명하기 위하여 다양한 심토파쇄 방법을 농경지에 적용한 후 토양의 물리적 특성을 조사하였다.

Materials and Methods

다짐토양과 심토파쇄 방법 다짐 농경지 토양의 물리성 개선 효과를 조사하기 위하여 심토파쇄를 실시한 5개의 농경지를 선정하였으며, 각각 삽질, 폭기, 굴삭, 심경, 견인의 심토파쇄 방법이 적용되었다. 심토파쇄 방법에 따른 운용장비, 경운시기, 시험농경지 및 토지이용형태는 Table 1에 나타내었다. 폭기식은 2016년 4월, 삽질식은 2017년 6월, 굴삭식은 2018년 4월, 심경식은 2018년 6월, 견인식은 2018년 8월에 심토파쇄를 진행하였고, 토양조사는 2018년 10월에 실시되었다. 대조토양은 심토파쇄 농경지와 동일한 작물을 재배하는 인접 농경지를 선정하였고 트랙터로 토심 15 cm까지 경운하였다. 완주와 안동은 밭, 산청은 과수원, 남원과 충주는 시설재배지로 이용되고 있었다.

Table 1. Information of the survey district and type of subsoil breaking.

Plot ID [†]	Method of subsoil breaking (Working period)	Type of pan-breaker	Survey district	Land use (Crop)
WJ-SP	Spading/spading machine (June, 2017)		787-23, Geumbyeong-ri, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do	Upland (Soybean)
WJ-CP	Conventional plowing/tractor		787-23, Geumbyeong-ri, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do	
SC-AR	Aeration/air-pressure pan-breaker (April, 2016)		San 25-2, Yupyeong-ri, Samjang-myeon, Sancheong-gun, Gyeongsangnam-do	Orchard (Apple)
SC-CP	Conventional plowing/tractor		San 25-2, Yupyeong-ri, Samjang-myeon, Sancheong-gun, Gyeongsangnam-do	
AD-EX	Excavation/excavator (April, 2018)		30-2, Dochon-ri, Bukhu-myeon, Andong-si, Gyeongsangbuk-do	Upland (Yam)
AD-CP	Conventional plowing/tractor		30, Dochon-ri, Bukhu-myeon, Andong-si, Gyeongsangbuk-do	
NW-DP	Deep plowing/deep plow (June, 2018)		884-9, Gogi-ri, Jucheon-myeon, Namwon-si, Jeollabuk-do	Plastic film house (Spinach)
NW-CP	Conventional plowing/tractor		884-8, Gogi-ri, Jucheon-myeon, Namwon-si, Jeollabuk-do	
CJ-TW	Towing/towed pan-breaker (August, 2018)		597-3, Bongbang-dong, Chungju-si, Chungcheongbuk-do	Plastic film house (Lettuce)
CJ-CP	Conventional plowing/tractor		597-1, Bongbang-dong, Chungju-si, Chungcheongbuk-do	

[†]WJ-SP, spading in Wanju-gun; WJ-CP, conventional plowing in Wanju-gun; SC-AR, aeration in Sancheong-gun; SC-CP, conventional plowing in Sancheong-gun; AD-EX, excavation in Andong-si; AD-CP, conventional plowing in Andong-si; NW-DP, deep plowing in Namwon-si; NW-CP, conventional plowing in Namwon-si; CJ-TW, towing in Chungju-si; CJ-CP, conventional plowing in Chungju-si.

토양 물리화학적 분석 토양의 물리화학적 특성은 Soil Survey Laboratory Methods Manual (USDA, 2004)과 토양화학분석법 (NAAS, 2010)을 기준으로 분석하였다. 토성은 피펫법으로 입경을 분석한 후 미국농무부 (United States Department of Agriculture) 기준의 토성삼각도표 (soil texture triangle)에 의하여 분류하였다. 용적밀도 (bulk density)와 토양삼상 (soil three phase)은 100 cm³ core can으로 시료를 채취하여 105°C에 48시간 건조하여 분석하였다. 원추관입저항은 원추관입시험기 (dynamic penetrometer, 06.15 penetrometer, Eijkelkamp, Netherlands)를 이용하여 0 - 80 cm까지 조사하였다. 원추의 각도는 60°이며, 지름은 1 cm 크기를 사용하였으며, 주입 속도는 2 cm sec⁻¹이었다. 토양의 투수속도는 USDA (2001)의 투수시험에 따라 내경 15.2 cm, 높이 12.7 cm인 금속원판을 이용하여 측정하였다. 토양 화학성 분석은 채취한 시료를 풍건쇄토 후 2.0 mm 체에 통과된 것을 분석대상 시료로 하였다. pH와

전기전도도 (EC, electrical conductivity)는 토양시료를 증류수와 1:5로 혼합하여 30분간 진탕한 현탁액을 pH meter/EC meter로 측정하였다. 토양유기물 (SOM, soil organic matter) 함량은 Tyurin법, 유효인산 (available phosphorus, avail. P_2O_5)은 Lancaster법으로 분석하였다. 치환성양이온 (exch. K, Ca, Mg, Na)은 5 g의 토양시료에 50 ml의 1.0N-ammonium acetate (pH 7.0)를 가하고 30분간 진탕하여 No. 2 여과지로 여과 후 유도결합플라즈마분광광도계 (ICP-OES, Integra XL Dual, GBC, Australia)를 이용하여 측정하였다.

Results and Discussion

원추관입저항 심토파쇄에 의한 토양다짐 개선효과 조사를 위하여 토양 깊이별 관입저항을 측정하였다 (Fig. 1). 원추관입시험기에 의해 측정된 원추지수 (cone index, CI)는 원추를 토양 속에 일정 속도로 관입시 단위면적에 가해지는 힘으로 정의되며 관입저항 (penetration resistance)으로도 나타낼 수 있다 (ASABE Standards, 2006). 대조토양의 관입저항 변화를 살펴보면 (Fig. 1), 완주 콩 경작지는 토심 10 cm 이후 완만한 증가 후 토심 15 cm에서 3 MPa 정도 이었다. 산청 사과 과수원은 토심 25 cm에서 4 MPa 정도로 급격한 증가 후 토심 40 cm까지 4 MPa가 지속되었다. 안동 마 경작지는 토심 20 cm 이후 완만한 증가를 보여 토심 35 cm에서 3 MPa 정도로 최대 관입저항이 나타난 후 65 cm까지 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 남원 상추 시설재배지는 토심 20 cm에서 35 cm까지 3 MPa로 최대 관입저항을 나타내었고 이후부터는 원추관입이 불가능한 자갈층이 나타났다. 충주 시금치 시설재배지는 토심 15 cm에서 20 cm까지 관입저항이 2.5 MPa로 나타난 후 30 cm까지 일시적으로 감소하였지만 다시 지속적으로 증가하였다. 심토파

Fig. 1. Soil penetration resistance on the agricultural land as affected by different subsoil breaking methods.

쇄 토양의 관입저항 변화를 살펴보면 (Fig. 1), 완주 삽질파쇄 토양은 45 cm까지, 산청 폭기파쇄 토양은 50 cm까지, 남원 심경파쇄 토양은 심토 25 cm 이하 자갈층이 존재하는 깊이까지 심토파쇄가 이루어진 것으로 나타났다. 그러나 안동 굴삭파쇄 토양에서는 표토 5 cm부터 관입저항이 나타나기 시작하여 토심 20 cm에서 3 MPa로 최대 관입저항을 보인 후 40 cm까지 2 MPa 이상을 유지하여 대조토양보다 관입저항이 높게 나타났다. 충주 견인파쇄 토양에서는 관입저항이 토심 10 cm에서 급격히 증가하여 20 cm에서 3 MPa 정도로 최대 관입저항을 보인 후 하부로 갈수록 서서히 감소하였다. 충주 견인파쇄 토양 역시 표토의 관입저항이 대조토양 보다 높게 나타났다.

물리적 특성 조사 대상지의 토성은 완주 삽질파쇄 토양 (미사질식양토), 완주 대조토양 (미사질식양토), 산청 폭기파쇄 토양 (사양토), 산청 대조토양 (사양토), 안동 굴삭파쇄 토양 (사양토), 안동 대조토양 (사양토), 남원 심경파쇄 토양 (양토), 남원 대조토양 (양토), 충주 견인파쇄 토양 (양토), 충주 대조토양 (미사질양토)로 나타났다 (Table 2). 심토파쇄로 다짐 개선효과가 나타난 완주, 산청, 남원의 표토 용적밀도는 각각 1.5 g cm^{-3} , 0.9 g cm^{-3} , 1.1 g cm^{-3} 으로서 그 대조토양 1.6 g cm^{-3} , 1.2 g cm^{-3} , 1.4 g cm^{-3} 보다 낮았다 (Table 2). 다짐 개선효과가 나타나지 않은 안동, 충주의 표토 용적밀도는 각각 1.7 g cm^{-3} , 1.4 g cm^{-3} 으로서 그 대조토양 1.6 g cm^{-3} , 1.1 g cm^{-3} 보다 높게 나타났다 (Table 2). 심

Table 2. Soil physical properties as affected by different subsoil breaking methods.

Plot ID [†]	Soil layer	Particle size distribution			Soil texture (USDA)	Bulk density	Soil three phase		
		Sand	Silt	Clay			Solid	Liquid	Gas
		----- % -----				g cm^{-3}	----- % (v/v) -----		
WJ-SP	Top	9.1	56.6	34.3	Silty clay loam	1.5	56.2	36.9	6.9
	Sub	10.2	55.6	34.2	Silty clay loam	1.6	59.9	35.2	4.9
WJ-CP	Top	9.8	56.8	33.4	Silty clay loam	1.6	61.6	30.4	8.0
	Sub	12.6	55.1	32.3	Silty clay loam	1.6	62.2	30.5	7.3
SC-AR	Top	56.3	31.0	12.7	Sandy loam	0.9	33.2	32.0	34.8
	Sub	59.9	25.8	14.3	Sandy loam	1.3	49.5	31.1	19.4
SC-CP	Top	52.1	35.5	12.4	Sandy loam	1.2	45.0	44.2	10.8
	Sub	60.1	31.1	8.8	Sandy loam	1.3	50.7	32.7	16.6
AD-EX	Top	72.1	22.5	5.4	Sandy loam	1.7	64.1	20.4	15.5
	Sub	90.4	3.8	5.8	Sandy loam	1.7	63.4	24.3	12.3
AD-CP	Top	79.3	16.4	4.3	Sandy loam	1.6	60.3	19.6	20.1
	Sub	75.6	18.2	6.2	Sandy loam	1.7	63.5	21.5	15.0
NW-DP	Top	40.9	38.9	20.2	Loam	1.1	43.0	25.4	31.6
	Sub	46.0	32.1	21.9	Loam	1.5	55.4	33.1	11.5
NW-CP	Top	35.4	40.8	23.8	Loam	1.4	52.5	39.6	7.9
	Sub	26.4	46.3	27.3	Clay loam	1.5	55.3	39.3	5.4
CJ-TW	Top	46.7	38.8	14.5	Loam	1.4	51.8	34.6	13.6
	Sub	46.1	40.2	13.7	Loam	1.5	58.0	36.0	6.0
CJ-CP	Top	30.3	52.0	17.7	Silt loam	1.1	39.7	21.5	38.8
	Sub	29.8	54.1	16.1	Silt loam	1.3	48.4	26.5	25.1

[†] WJ-SP, spading in Wanju-gun; WJ-CP, conventional plowing in Wanju-gun; SC-AR, aeration in Sancheong-gun; SC-CP, conventional plowing in Sancheong-gun; AD-EX, excavation in Andong-si; AD-CP, conventional plowing in Andong-si; NW-DP, deep plowing in Namwon-si; NW-CP, conventional plowing in Namwon-si; CJ-TW, towing in Chungju-si; CJ-CP, conventional plowing in Chungju-si.

토파쇄에 따른 삼상의 변화에서도 용적밀도와 동일한 경향이 나타나 굴삭파쇄와 견인파쇄를 적용한 토양에서 고상과 액상은 대조토양보다 높고 기상은 낮게 나타났으며, 견인파쇄의 경우 기상이 2배 이상 낮아져 물리성이 악화된 것으로 나타났다. Ogbodo (2005)의 연구에 의하면 토양의 용적밀도는 경운 깊이가 20 cm, 30 cm, 40 cm일 때 무경운에 비해 각각 13%, 15%, 22%까지 감소하였으며, Seo et al. (2012)의 연구에서 진동형 심토파쇄는 관행경운으로 불가능한 40 cm 깊이까지 토양을 파쇄하면서 경반층이 제거되어 파쇄공이 생성되기 때문에 투수성 및 통기성이 증진되어 토양 물리성 개선효과가 뛰어나다고 하였다.

화학적 특성 심토파쇄를 실시한 토양과 관행경운을 적용한 대조토양의 화학적특성은 Table 3에 나타내었다. 완주 삽질파쇄 토양의 전기전도도 (EC, electrical conductivity)는 표토 0.6 d S m^{-1} , 심토 0.5 d S m^{-1} 인 반면 완주 대조토양은 표토 3.0 d S m^{-1} , 심토 2.7 d S m^{-1} 로서 5배 정도 차이가 났다. 산청은 폭기파쇄 토양과 대조토양 모두에서 전기전도도, 토양 유기물, 치환성 칼슘, 치환성 나트륨이 심토보다 표토에서 높게 나타났으며, 폭기파쇄 토양의 유효인산이 표토 $1,650 \text{ mg kg}^{-1}$, 심토 $1,643 \text{ mg kg}^{-1}$ 로서 대조토양 표토 791 mg kg^{-1} , 심토 680 mg kg^{-1} 보다 2배 이상 높았으나 심토파쇄에 따른 상하반전으로 표토와 심토간의 차이는 대조토양보다 적었다. 산청 대조토양의 치환성 칼슘은 표토

Table 3. Soil chemical properties as affected by different subsoil breaking methods.

Plot ID [†]	Soil layer	pH	EC [‡]	SOM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. cation			
						K	Ca	Mg	Na
		(H ₂ O, 1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	----- cmol _c kg ⁻¹ -----			
WJ-SP	Top	6.7	0.6	14	271	0.62	6.73	1.99	0.75
	Sub	6.7	0.5	15	300	0.68	6.70	2.01	0.75
WJ-CP	Top	6.6	3.0	13	202	0.65	6.62	2.00	0.76
	Sub	6.5	2.7	12	199	0.66	6.46	1.97	0.75
SC-AR	Top	6.1	2.0	43	1,650	1.59	12.55	1.23	0.54
	Sub	5.6	0.3	18	1,643	1.51	4.68	1.25	0.41
SC-CP	Top	7.7	0.7	43	791	1.45	22.02	1.43	0.50
	Sub	7.2	0.2	12	680	1.36	7.29	0.88	0.42
AD-EX	Top	7.6	0.3	9	246	1.50	7.14	1.22	0.45
	Sub	6.9	0.2	10	232	1.60	7.36	1.20	0.45
AD-CP	Top	7.0	0.3	12	130	1.09	6.01	1.09	0.42
	Sub	7.0	0.2	10	152	1.28	5.67	1.44	0.46
NW-DP	Top	6.9	2.4	42	593	2.14	11.17	2.82	0.73
	Sub	7.4	3.5	43	616	1.91	12.71	3.37	1.01
NW-CP	Top	6.0	0.2	34	398	2.31	6.21	1.46	0.47
	Sub	5.9	0.3	29	69	1.50	5.24	1.33	0.49
CJ-TW	Top	7.0	4.4	37	1,182	1.54	13.43	4.87	1.14
	Sub	7.3	1.1	31	1,044	1.06	12.07	4.16	0.96
CJ-CP	Top	7.9	2.7	26	1,101	0.56	12.58	3.61	0.92
	Sub	7.5	1.2	23	671	0.45	10.86	3.96	1.01

[†]WJ-SP, spading in Wanju-gun; WJ-CP, conventional plowing in Wanju-gun; SC-AR, aeration in Sancheong-gun; SC-CP, conventional plowing in Sancheong-gun; AD-EX, excavation in Andong-si; AD-CP, conventional plowing in Andong-si; NW-DP, deep plowing in Namwon-si; NW-CP, conventional plowing in Namwon-si; CJ-TW, towing in Chungju-si; CJ-CP, conventional plowing in Chungju-si.

[‡]EC, electrical conductivity; SOM, soil organic matter.

22.02 cmol_c kg⁻¹ (pH 7.7), 7.29 cmol_c kg⁻¹ (pH 7.2)로서 폭기파쇄 토양의 치환성 칼슘은 표토 12.55 cmol_c kg⁻¹ (pH 6.1), 심토 4.68 cmol_c kg⁻¹ (pH 5.6)보다 2배 가까이 높았으며, 대조토양이 상대적으로 pH와 치환성 칼슘 함량이 높아 인산의 유효도를 감소시킨 것으로 판단된다. 토양 중 인산이온 ($\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$, HPO_4^{-2})은 염기성 조건에서 칼슘과 불용성 칼슘인산화합물을 형성하여 유효도가 감소하게 된다 (Raven and Hossner, 1993; Lee and Doolittle, 2004). 안동은 굴삭기 파쇄 토양이 대조토양 보다 유효인산, 치환성 칼륨, 치환성 칼슘이 약간 높게 나타났다. 남원은 심경파쇄 토양의 전기전도도, 유효인산, 치환성 칼슘, 치환성 마그네슘이 대조토양보다 높게 나타났으며, 대조토양의 유효인산은 표토 (398 mg kg⁻¹)가 심토 (69 mg kg⁻¹)보다 5배 이상 높았다. 충주는 견인파쇄 토양의 토양유기물, 치환성 칼륨, 치환성 칼슘, 치환성 마그네슘이 대조토양보다 높게 나타났다. 파쇄유형 및 토양깊이에 따른 토양화학성의 특이적 관련성은 나타나지 않았다. 토지이용형태가 시설재배지인 남원 심경파쇄와 충주 견인파쇄 토양은 전기전도도, 치환성 칼슘 및 치환성 마그네슘이 높은 수준이었다. 한편 Song et al. (2012)은 70 cm 깊이로 심토반전을 실시한 결과 표토에서 pH, 전기전도도, 토양유기물, 유효인산, 치환성 양이온이 모두 감소하여 심토반전 1년차 토양은 100%, 2년차 토양은 50% 정도로 비료 사용량을 추가하는 것이 적합할 것이라고 하였다.

투수속도 및 다짐층 형성 심토의 토성별 투수속도는 사토 2 cm hr⁻¹ 이상, 사질과 미사질 토양 1 - 2 cm hr⁻¹, 양토 0.5 - 1.0 cm hr⁻¹, 점토질 토양 0.1 - 0.5 cm hr⁻¹, 염분함유 점토질 토양 0.5 cm hr⁻¹ 이하로 토성 및 염농도와 관련이 있는 것으로 (Hillel, 1982.) 보고된 바 있으나 조사대상 토양은 토성과 투수속도 간에 일정한 경향이 없었다. 심토파쇄를 실시한 대상농경지 토심 15 cm 깊이의 투수속도는 완주 삽질파쇄 (미사질식양토) 2.5 cm hr⁻¹, 산청 폭기파쇄 (사양토) 98.2 cm hr⁻¹, 안동 굴삭파쇄 (사양토) 0.6 cm hr⁻¹, 남원 심경파쇄 (양토) 8.7 cm hr⁻¹, 충주 견인파쇄 (양토) 17.6 cm hr⁻¹으로 폭기파쇄한 산청 과수원 토양에서 가장 높았다. 심토파쇄 유형에 따라 삽질파쇄, 폭기파쇄, 심경파쇄는 관행경운에 비하여 투수속도가 빨랐으나 굴삭파쇄 및 견인파쇄는 관행경운보다 투수속도가 느리게 나타났다 (Table 4). Donahue et al. (1977)의 투수등급에 따라 분류하면 안동 굴삭파쇄 및 관행경운 토양만 보통느림 (moderately slow)

Table 4. Infiltration rate on the plow pan as affected by different subsoil breaking methods.

Plot ID [†]	Treatment	Infiltration rate (cm hr ⁻¹)	Infiltration class (Donahue et al., 1977)
WJ-SP	Pan-breaking to 50 cm depth with spading machine	2.5	Moderate
WJ-CP	Conventional plowing to 15 cm depth	2.0	Moderate
SC-AR	Pan-breaking to 50 cm depth with air-pressure pan-breaker	98.2	Very rapid
SC-CP	Conventional plowing to 15 cm depth	4.1	Moderately rapid
AD-EX	Pan-breaking to 100 cm depth with excavator	0.6	Moderately slow
AD-CP	Conventional plowing to 15 cm depth	1.4	Moderately slow
NW-DP	Pan-breaking to 30 cm depth with deep plow	8.7	Moderately rapid
NW-CP	Conventional plowing to 15 cm depth	2.0	Moderate
CJ-TW	Pan-breaking to 50 cm with towed pan-breaker	17.6	Rapid
CJ-TW	Conventional plowing to 15 cm depth	64.5	Very rapid

[†] WJ-SP, spading in Wanju-gun; WJ-CP, conventional plowing in Wanju-gun; SC-AR, aeration in Sancheong-gun; SC-CP, conventional plowing in Sancheong-gun; AD-EX, excavation in Andong-si; AD-CP, conventional plowing in Andong-si; NW-DP, deep plowing in Namwon-si; NW-CP, conventional plowing in Namwon-si; CJ-TW, towing in Chungju-si; CJ-CP, conventional plowing in Chungju-si.

(Soil depth of 25 - 39 cm in Andong-si)

(Soil depth of 15 - 35 cm in Chungju-si)

Fig. 2. Soil structure of the agricultural land in Andong-si and Chungju-si after subsoil breaking.

등급 일뿐 다른 지역의 심토파쇄와 관행경운 토양은 모두 보통 (moderate) 등급 이상이었다 (Table 4). 조사시점인 2018년 10월을 기준으로 안동 굴삭파쇄 토양은 2018년 4월 이후 6개월, 충주 견인파쇄 토양은 2018년 8월 이후 2개월 정도 심토파쇄 기간이 경과한 토양임에도 불구하고 안동 마재배지는 토심 25 - 39 cm, 충주 시설사금치 재배지는 토심 15 - 35 cm에서 판상구조의 다짐층이 형성되었다 (Fig. 2). 안동 굴삭파쇄와 충주 견인파쇄 두 토양 모두 다짐층이 형성되었음에도 불구하고 굴삭파쇄와 견인파쇄의 투수속도가 각각 0.6 cm hr^{-1} (보통느림), 17.6 cm hr^{-1} (빠름)으로 차이가 발생하였다. Table 2에서 토양 물리성을 살펴보면 안동 굴삭파쇄 토양의 용적밀도, 고상비율이 각각 1.7 g cm^{-3} , 64.1%로서 충주 견인파쇄 토양 (표토기준; 용적밀도 1.4 g cm^{-3} , 고상비율 51.8%) 보다 높게 나타났으며, 물의 이동이 일어나는 액상과 기상의 합은 35.9% (안동 굴삭파쇄), 48.2% (충주 견인파쇄)이다. 따라서 안동 굴삭파쇄 토양의 높은 용적밀도와 고상비율이 투수속도에 영향을 준 것으로 판단된다.

이상의 조사결과를 살펴보면, 완주 삽질파쇄, 산청 폭기파쇄 토양은 심토파쇄로 인한 물리성 개선효과가 나타났으며, 특히 남원 심경파쇄 토양은 토양깊이 25 cm 이상에서 자갈층이 존재함에도 불구하고 물리성 개선효과를 확인할 수 있었다. 그러나 안동 굴삭파쇄 및 충주 견인파쇄 토양은 대조토양에 비하여 용적밀도 증가 및 투수성 감소 등 심토 물리성이 퇴화한 것으로 나타났다.

관리이력 심토파쇄 이후 토양 물리성이 퇴화한 토양의 관리이력을 살펴보면, 안동 굴삭파쇄 토양은 트랙터 부착 용 대형 운반기를 활용하여 마수확을 일관 작업하고 있었다. 충주 견인파쇄 토양은 시설재배지 침수 후 습윤상태에서 무거운 파종기로 시금치를 파종한 바 있었으며, 동일 시설내 토양 다짐정도는 시설 입구 쪽에서 심하게 나타나기도 하였다. 한편, 토양의 기계적 다짐은 점토함량 29.3%일 때 압축지수가 최대치가 되며 (Keller and Hakansson, 2010), 동일한 하중의 농기계에서 광폭보다는 협폭의 차륜이 심하고, 토양수분 상태가 액성한계 이하 수축한계 이상의 반강성 상태에서 큰 것으로 알려져 있다 (Larson et al., 1980; Lebert and Horn, 1991; Smith et al., 1997; Imhoff et al., 2004). 일반적으로 대형농기계 사용으로 심토층에 압력이 가해져 횡수를 거듭할수록 경반층의 두께가 서서히 증가하며 (Shierlaw and Alston, 1984), 논토양에서 심토파쇄를 매년 실시할수록 물리성 효과의 지속성은 2년 정도 유지되므로 3년 주기가 적정한 것으로 보고되기도 하였다 (Min et al., 1983). 그러나 안동이나 충주의 경우처럼 심토파쇄 후 농작

업시 토양 수분상태, 농기계 종류 및 사용 기간 등 토양관리에 따라 재다짐이 나타나 적정 심토파쇄 주기 설정이 어려우므로 적정 심토파쇄 시기는 토양다짐 조사를 통하여 판단해야 한다.

Conclusions

토양에 반층이 형성되면 작물 뿌리 뻗음, 물의 침투, 모세관 상승 등의 억제로 작물 생산성이 감소되므로 토양 물리성 개선이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 심토파쇄 방법을 농경지에 적용한 후 토양의 물리적 특성을 조사하였으며, 이에 따른 물리성 개선 효과를 구명하고자 하였다. 완주 삽질파쇄 토양, 산청 폭기파쇄 토양, 남원 심경파쇄 토양은 대조토양보다 관입저항이 낮게 나타났으나, 안동 굴삭파쇄 토양과 충주 견인파쇄 토양은 표토층의 관입저항이 대조토양보다 높게 나타났다. 삽질파쇄(완주), 폭기파쇄(산청), 심경파쇄(남원)를 실시한 토양에서 유효토심 증가, 용적밀도 감소, 투수속도 증가 등 심토파쇄에 의한 물리성 개선 효과가 나타났다. 그러나 굴삭파쇄(안동) 및 견인파쇄(충주)를 실시한 토양에서는 심토파쇄 후 부적절한 농기계 사용으로 표토에 판상구조가 형성되는 등 재다짐이 발생하여 용적밀도 증가, 투수성 감소 등 물리성이 악화된 것으로 나타났다. 따라서 심토파쇄 주기는 심토파쇄 이후 농작업시 토양 수분상태, 농기계 종류 및 사용 기간 등 토양관리 이력에 따라 다양하므로 토양 반층 유무에 따라 결정해야 한다.

Acknowledgement

This study was financially supported by a grant from the research project (No. PJ01353701) of National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- ASABE Standards. 2006. ASAE S313.3: Soil cone penetrometer. American Society of Agricultural and Biological Engineer, St. Joseph, MI, USA.
- Donahue, R.I., R.W. Miller, and J.C. Shickluna. 1977. Soils : An introduction to soils and plant growth. Prentice Hall, Englewood, New Jersey.
- Ehlers, W., V. Popke, F. Hesse, and W. Bohm. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loam soil. Soil Till. Res. 3:261-275.
- Grossman, R.B. and F.J. Carlisle. 1969. Fragipan soils of the Eastern United States. Adv. Agron. 21:237-239.
- Hillel, D. 1982. Introduction to soil physics. Academic Press, San Diego, CA, USA.
- Imhoff, S., A.P. da Silva, and D. Fallow. 2004. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:17-24.
- Kay, B.D. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. Advances in Soil Science 12. Springer, New York, NY, USA.
- Keller, T. and I. Hakansson. 2010. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. Geoderma. 154:398-406.
- Kim, L.Y. and I.S. Jo. 1998. Soil physics. Korean J. Soil Sci. Fert. 31(S.I):7-18.
- Kim, L.Y., H.J. Cho, B.K. Hyun, and W.P. Park. 2001. Effects of physical improvement practices at plastic film

- house soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 34(2):92-97.
- Kok, H., R.K. Taylor, R.E. Lamond, and S. Kessen. 1996. Soil compaction: problems and solutions. Cooperative extension service (AF-115), Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA.
- Larson, W.E., S.C. Gupta, and R.A. Useche. 1980. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:450-457.
- Lebert, M. and R. Horn. 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Till. Res.* 19:275-286.
- Lee, J.H. and J.J. Doolittle. 2004. Measurement of phosphorus buffering power in various soils using desorption isotherm. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37(4):220-227.
- Min, K.B., J.J. Kim, S.J. Cho, and J.N. Im. 1983. The effects of subsoiling at different depths and spacings on physical properties of soil and rice yields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 16(3):228-234.
- NAAS. 2010. Methods of soil chemical analysis. National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- NIAST. 2000. Taxonomical classification of Korean soils. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Ogbodo, E.N. 2005. Effect of depth of tillage on soil physical conditions, growth and yield of sweet potato in an ultisol at abakaliki, Southeastern Nigeria. *J. Agric. Soc. Res.* 5(1):41-47.
- Raghavan, G.S., V.E. Mckyes, F. Taylor, P. Richard, and A. Watson. 1979. The relationship between machinery traffic and corn yield reductions in successive years. *Trans. ASAE.* 22(4):1256-1259.
- Raven, K.P. and L.R. Hossner. 1993. Phosphorus desorption quantity-intensity relationships in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1501-1508.
- Schäffer, B., M. Stauber, R. Muller, and R. Schulin. 2007. Changes in the macro-pore structure of restored soil caused by compaction beneath heavy agricultural machinery: a morphometric study. *Eur. J. Soil Sci.* 58(5):1062-1073.
- Seo, J.H., S.B. Back, Y.U. Kwon, C.G. Kim, K.H. Jung, G.H. Jung, J.E. Lee, B.Y. Son, and S.J. Kim. 2012. Effect of subsoiling on silage maize yield on paddy field converted to upland condition. *Korean J. Crop Sci.* 57(4):430-435.
- Shierlaw, J. and A.M. Alston. 1984. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant Soil.* 77:15-28.
- Smith, C.W., M.A. Johnston, and S. Lorentz. 1997. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactibility and compressibility. *Soil Till. Res.* 43:335-354.
- Sojka, R.E., W.J. Busscher, D.T. Gooden, and W. H. Morrison. 1990. Subsoiling for sunflower production in the southeast coastal plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54(4):1107-1112.
- Song, H.A., K.C. Park, and S.Y. Lee. 2012. Effect of virus-free plant and subsoiling reversion soil for reduction of injury by continuous cropping of sweet Potato. *Korean J. Crop Sci.* 57(3):254-261.
- Steele, F., R.B. Daniels, E.E. Gamble, and L.A. Nelson. 1969. Fragipan horizons and Be masses in the middle coastal plain of North Carolina. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33:752-755.
- Taylor, H.M. and H.R. Gardner. 1963. Penetration of cotton seedling tap roots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Sci.* 96(3):153-156.
- USDA. 2001. Soil quality test kit guide. United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
- USDA. 2004. Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigation Report No. 42. Version 4.0. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA.
- Zhang, Y.S., Y.H. Moon, Y.K. Sonn, K.H. Jung, H.R. Cho, and K.H. Han. 2015. Effect of deep ploughing with a spading machine and an excavator on improvement of physical properties in the highland applied saprolite. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48(5):564-569.