

Short communication

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2018.51.4.499>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Effects of Agro-machine Operating Period on Soil Physical Properties in Upland Fields

Hee-Rae Cho and Kyung-Hwa Han*

Soil and Fertilizer Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: bearthink@korea.kr

ABSTRACT

Received: September 28, 2018**Revised:** November 5, 2018**Accepted:** November 12, 2018

The subsoil compaction by heavy agro-machine is an ongoing cumulative process and threat in sustainable agriculture, especially exchange land use. The knowledge concerning the effects of agro-machine on soil physical properties in upland is necessary in arable soil management. The purpose of this study is to assess soil physical properties by heavy agro-machine operating period in upland. The choice of target soils was based on soil series, which preferentially have larger area in Korean upland field, including ranking 1st to 29th. Investigated sites of chosen soil series were designated at mainly distributed area of them. The soil physical properties include plow pan depth, bulk density, soil hardness and saturated hydraulic conductivity. From the investigation, soils with heavy agro-machine longer than 10 years, showed higher plow pan thickness, bulk density and hardness, and shallower surface soil depth than soils with heavy agro-machine shorter than 9 yrs. The value of plow pan thickness, bulk density, hardness, and surface soil depth is 19.8 cm, 1.54 Mg m⁻³, 21.8 mm and 16.9 cm in front one and 15.2 cm, 1.48 Mg m⁻³, 19.3 mm and 18.1 cm in back one. Especially fine silty and heavy clayey upland soils had an increase of plow pan thickness and decrease of saturated hydraulic conductivity by longer use of heavy agro-machine when classified by different soil textural families and upland soil types. Therefore, periodic improvement of physical properties is needed for upland soil management in the long-term point of view.

Keywords: Agro-machine, Soil physical properties, Subsoil compaction, Hydraulic conductivity, Plow pan

The change in physical properties of upland soils as increase of heavy agro-machine use period.

Items	Depth	Years with heavy agro-machine		Ratio (B/A)
		<9 (A)	>10 (B)	
Average years		8	13	1.58
Surface soil depth (cm)		18.1 ± 2.1 a	16.9 ± 1.7 b	0.93
Plowing depth (cm)		13.5 ± 1.5 ns	13.0 ± 1.2 ns	0.96
Plow pan thickness (cm)		15.2 ± 4.2 b	19.8 ± 4.5 a	1.30
Bulk density (Mg m ⁻³)	top	1.24 ± 0.12 b	1.34 ± 0.12 a	1.08
	sub	1.48 ± 0.09 b	1.54 ± 0.08 a	1.04
Porosity (%)	top	53.4 ± 4.2 a	49.3 ± 4.7 b	0.93
	sub	44.2 ± 3.5 a	42.0 ± 3.1 b	0.95
Hardness (mm)	top	10.3 ± 2.6 b	12.7 ± 2.5 a	1.23
	sub	19.3 ± 3.1 b	21.8 ± 3.0 a	1.13

Data are means±standard deviation.

Different letters in the same row indicate significant difference according to t-test ($p < 0.05$).



Introduction

최근 대형농기계 사용 증대와 논, 밭을 시설재배지로의 농지 지목변경 증가로 농경지의 토양 물리적 특성 변화가 심화되고 있다. 통계청 농업면적 조사자료 (2018)에 따르면 2017년 기준 시설재배 작물면적의 84%가 밭으로 2000년 이후 꾸준히 증가하고 있으며, 2017 기준 트랙터 보유대수는 21만 6천대로 2003년부터 2017년까지 트랙터는 37% 증가하였고 이 중 60마력 이상의 대형트랙터는 두 배 이상 증가하였다. 토양구조는 물과 공기의 흐름에 영향을 주기 때문에 물 관리에 매우 중요한 중요한 요인 중 하나이다. 특히 시설재배지는 비가림 환경으로 재배시기가 다양하고 일 년에 여러 작기의 영농이 이루어지기 때문에 시설재배지의 물 관리는 밭에 비하여 어려우며 경반층 형성 및 토양투수성이 중요한 관리인자가 된다. 지목변경이 잦은 현대 농업에서 기계적 다짐에 의한 밭 토양 물리성 변화에 실태파악이 중요하다. 대형농기계 사용은 깊이의 토양층에 압력을 가하고 횡수를 거듭할수록 경반층 (plow pan)의 두께가 증가한다 (Shierlaw and Alston, 1984). 농기계 운행은 토양구조와 토양 내 공극의 양, 분포 및 공극연결성에 영향을 주어 (Schaffer et al., 2007) 토양이 단단해지거나 물 빠짐이 느려지는 등의 문제를 발생하게 할 수 있다. Seo et al. (2016)은 사양토에서 쟁기 바닥층에서 물의 하향 이동이 제한되고 전 토층의 물의 하향이동을 결정하게 된다고 언급하였다. 이는 작물의 생육에 영향을 끼치게 되며 기계적 저항이 증가하거나 (Unger and Kaspar, 1994) 산소공급의 감소로 (Czyz, 2004) 인해 작물의 뿌리뻗음이 제한되고 (Cook et al., 1996) 결과적으로 생산성에 영향을 주게 된다 (Letey 1985; Saqib et al., 2004). 완두 뿌리뻗음은 경도가 증가할수록 감소하여 생육에 제한을 주는 한계 산중식 경도가 24 mm 라고 보고되었다 (Jo et al., 1977). 사과 과원에서 경반층이 토심 40 cm 이내에 나타날 때 사과 수량이 약 36% 감소하였다고 보고되었다 (Kim and Jo, 1998). 특히 심토의 다짐 (subsoil compaction) 은 일단 한 번 발생하면 구조가 회복되기 어렵고 영구적이라는 점에서 심각한 문제가 된다 (Akker and Canarache, 2001; Horn and Fleige, 2009). 단기적으로는 표토의 다짐의 피해가 더 빨리 나타나지만, 장기적으로는 다짐이 누적되고 복원이 쉽지 않으며 일부는 영향이 지속적으로 나타나는 심토의 다짐이 더 심각하다 (Alakukku, 2000; Voorhees, 2000). 지금까지 다짐에 대한 물리성 변화 및 작물 생육에의 영향을 분석한 많은 연구가 있었지만, 농기계 사용 연차에 따른 물리성 변화에 대한 연구는 많지 않다. 본 연구에서는 농기계 사용연차가 증가함에 따라 대형농기계 사용연차에 따른 밭의 심토 물리성 변화를 분석하여 농기계에 대한 영향을 평가하였다.

Materials and Methods

조사대상 및 토양속성조사 우리나라 대표적인 밭 토양의 물리성을 조사하기 위해 제주도를 제외한 분포면적이 넓은 토양통 29개를 택하여 조사지역을 선정하였다 (Table 1). 2007년부터 2008년까지 각 지역에서 농기계 사용 연차 9년 이하인 곳과 10년 이상인 곳을 선택하여 64지점을 조사하였다. 조사대상에서 석력함량 35% 이상인 석력토는 제외하였다. 토양통 분포면적, 밭토양 유형 및 토성속 (soil textural families) 등은 한국토양총설 (NIAST, 1992) 및 Taxonomical classification of Korean soils (NIAST, 2000)을 참고하였다.

토양물리성 조사 밭의 토양물리성으로 관입저항, 경반층 특성, 표토심, 경운심, 밭의 표토와 심토에 대한 용적밀도, 공극률, 산중식 경도, 심토 포화수리전도도 등을 조사하였으며, 표토와 심토의 토양시료는 경운깊이를 기준으로 채취하였다. 관입저항, 경반층이 나타나는 최소와 최대 깊이, 두께는 토양관입저항계 (Penetrologger, Eijkelkamp,

Table 1. Investigated soils of characterizing physical properties for upland soils.

Soil textural family	Soil series	Investigated points
Sandy	Togye (Typic Quartzipsamments)	2
	Nagdong (Typic Quartzipsamments)	2
	Haeri (Typic Quartzipsamments)	2
	Hwabong (Typic Quartzipsamments)	2
Coarse loamy	Sangju (Coarse loamy, Dystric Fluventic Eutrudepts)	2
	Jigog (Coarse loamy, Typic Dystrudepts)	4
	Jungdong (Coarse loamy, Typic Udifluvents)	2
	Noegog (Coarse loamy, Fluvaquentic Dystrudepts)	2
	Seongsan (Coarse loamy, Typic Dystrudepts)	2
	Deogcheon (Coarse loamy over sandy skeletal, Typic Udifluvents)	2
	Gwacheon (Coarse loamy, Dystric Fluventic Eutrudepts)	2
	Bonryang (Coarse loamy over sandy, Typic Udifluvents)	2
Fine loamy	Weongog (Fine loamy, Fluventic Dystrudepts)	2
	Daegog (Fine loamy, Fluvaquentic Dystrudepts)	2
	Yonggye (Fine loamy, Typic Dystrudepts)	2
	Ugog (Fine loamy, Typic Dystrudepts)	2
	Baegsan (Fine loamy, Dystric Fluventic Eutrudepts)	2
	Banho (Fine loamy, Dystric Fluventic Eutrudepts)	4
	Bugog (Fine loamy, Typic Fragiudalfs)	2
	Anryong (Fine loamy, Typic Hapludalfs)	2
Fine silty	Ihyeon (Fine silty over coarse silty, Dystric Fluventic Eutrudepts)	4
	Yeongog (Fine silty, Aquic Fragiudalfs)	2
Clayey	Gopyeong (Fine, Typic Hapludalfs)	2
	Bancheon (Fine, Typic Hapludalfs)	2
	Pogog (Fine, Aquic Fragiudalfs)	2
	Uji (Fine, Typic Hapludalfs)	2
	Jangpa (Fine, Typic Hapludalfs)	2
	Bansan (Fine, Humic Hapludults)	2
	Pyeongan (Fine, Typic Hapludalfs)	2

Holland) 를 이용하여 측정하였다. 산중식 (Yamanaka) 경도는 토양경도계 (Strength of spring 78.4 N/40 mm, cone angle 25°, 20', Japan)로 측정하였다. 용적밀도와 공극률은 100 cm³ 코어 시료를 채취하여 건토중량법으로 분석하였고, 심토의 포화수리전도도는 채취한 코어를 수조에서 포화시킨 후 정수위법 및 변수위법으로 측정하였다 (NAS, 2017).

정수위법 계산식

$$K_s = Q \times \frac{L}{A \Delta H} \times \frac{nt}{n_{25}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Q : 투수량 (cm³/hr)

L : 토주 길이 (cm)

A : 토주의 단면적 (cm²)

ΔH : 수두차 (cm)

n_t : t°C에서의 물의 점성계수(Centipoise)

n_{25} : 25°C 표준상태에서의 물의 점성계수(Centipoise)

K_{25} : 25°C 표준상태에서의 수리전도도 (cm/hr)

변수위법 계산식

$$K_s = \frac{d_t^2}{d_c^2} \times \frac{L}{t} \times 2.303 \log \frac{h_0}{h_t} \tag{Eq. 2}$$

d_t : 수관의 직경 (cm)

d_c : 토주의 직경 (cm)

L : 토주 길이 (cm)

h_0 : 초기수위, h_t : t시간 경과 후 수위 (cm)

통계처리 농기계 사용연차 9년 이하와 10년 이상의 두 그룹으로 나누어 연차에 따른 토양물리적 특성을 비교하되, t-test로 통계적 유의성을 검정하였다. 토성속별로 그룹을 나누어 토양물리적 특성을 비교하였는데, GLM으로 검정 후 Duncan’s Multiple Range test를 이용하여 유의성을 검정하였다. 농기계 사용연차에 따른 용적밀도, 경반층 두께 및 경도 간에 관계를 회귀분석하였다. 통계분석은 SAS 통계 프로그램을 이용하였으며 5%에서 통계적 유의성을 검정하였다(SAS, ver. 9.2, Cary, NC).

Results and Discussion

농기계 사용연차에 따른 밭 토양 물리성 변화 Cho 등(2016)에 의하면 밭 토양물리성 개량 기준을 심토 용적 밀도가 사양토 1.55 Mg m⁻³, 양토 1.50 Mg m⁻³, 미사질식양토 1.45 Mg m⁻³ 미만으로 보고하였고, 이에 근거하여 심토 용적

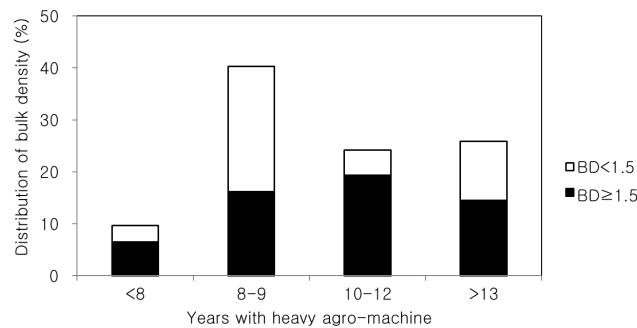


Fig. 1. Distribution of subsoil bulk density according to years with heavy agro-machine. Bulk density distribution classified by value of 1.5 Mg m⁻³

Table 2. The change in physical properties of upland soils as increase of heavy agro-machine use period.

Items	Depth	Years with heavy agro-machine		Ratio (B/A)
		<9 (A)	>10 (B)	
Average years		8	13	1.58
Surface soil depth (cm)		18.1 ± 2.1 a	16.9 ± 1.7 b	0.93
Plowing depth (cm)		13.5 ± 1.5 ns	13.0 ± 1.2 ns	0.96
Plow pan thickness (cm)		15.2 ± 4.2 b	19.8 ± 4.5 a	1.30
Bulk density (Mg m ⁻³)	top	1.24 ± 0.12 b	1.34 ± 0.12 a	1.08
	sub	1.48 ± 0.09 b	1.54 ± 0.08 a	1.04
Porosity (%)	top	53.4 ± 4.2 a	49.3 ± 4.7 b	0.93
	sub	44.2 ± 3.5 a	42.0 ± 3.1 b	0.95
Hardness (mm)	top	10.3 ± 2.6 b	12.7 ± 2.5 a	1.23
	sub	19.3 ± 3.1 b	21.8 ± 3.0 a	1.13

Data are means±standard deviation.

Different letters in the same row indicate significant difference according to t-test ($p < 0.05$).

밀도 1.5 Mg m⁻³ 미만인 지점과 이상인 지점의 분포를 농기계 사용연차에 따라 분석하였다(Fig. 1) 농기계 사용연차 10-12년 범위에서 1.5 Mg m⁻³ 미만 지점이 5%, 1.5 Mg m⁻³ 이상 지점이 19%로 10년 이상에서 1.5 Mg m⁻³를 초과하는 지점이 보다 많아졌다. 따라서 10년 차를 기준으로 다짐이 심화되었음을 판단하였고, 9년 이하인 지점과 10년 이상인 지점을 기준으로 그룹으로 나누어 토양 물리성을 분석하였다. 10년 이상인 밭은 9년 이하 밭에 비해 경반층 두께, 용적밀도, 경도가 증가하였고 공극률과 표토심이 감소하였으며, 경운심은 통계적으로 유의한 차이가 없었다(Table 2). 경반층 두께는 15.2 cm에서 19.8 cm로 증가하였는데, 농기계 운행 횟수 증가에 따른 경반층 두께가 증가한다는 것과 일치하는 결과였다(Shierlaw and Alston, 1984). 용적밀도는 표토 1.24 Mg m⁻³에서 1.34 Mg m⁻³, 심토 1.48 Mg m⁻³에서 1.54 Mg m⁻³로, 산중식 경도는 표토 10.3 mm에서 12.7 mm, 심토 19.3 mm에서 21.8 mm로 증가하였으며, 표토심은 18.1 cm에서 16.9 cm로 감소하였다. 농기계 사용연차가 증가함에 따라 심토는 더 단단해져 용적밀도가 증가하는 것으로 판단되었다. 농기계 사용으로 증가된 용적밀도와 경도는 작물생육에 영향을 미칠 수 있다. 토양다짐에 따른 경도 및 용적밀도 증가로 완두와 대맥 뿌리 신장속도 및 분포비율이 감소하였으며(Jo et al., 1977; Jo et al., 1983), 밭에서는 아파나까 경도가 23-24 mm 이상이 되면 근근발달이 아주 불량해진다고 보고되었다(Jo et al., 1977). 일본에서는 화산회, 사질, 양질, 점질 등의 토양 및 과채, 엽채, 단근채, 장근채 등의 작물로 나누어 적정 경도를 18-24 mm 이하로 제시한다(Japan soil association, 1986).

토성속에 따른 경반층 두께, 용적밀도, 경도 토성속별로 분류하여 토성속에 따른 경반층 두께, 심토 용적밀도, 심토 경도 평균치를 비교하였다(Table 3). 토성속별 비교에서는 경반층 두께는 통계적 유의성이 나타나지 않았고, 심토 용적밀도는 사양질이 1.56 Mg m⁻³로 높고 미사식양질 1.46 Mg m⁻³, 식질 1.47 Mg m⁻³로 낮았으며, 심토 경도는 미사식양질 22.9 mm로 가장 높고, 사질에서 17.6 mm로 가장 낮았다.

토성속별로 사용연차에 따른 심토 용적밀도를 회귀분석하였다(Fig. 2). 토성속별로 농기계 사용연차에 따른 심토 용적밀도 회귀분석에서는 어떤 그룹에서도 통계적 유의성을 보이지 않았다. 용적밀도는 입경분포, 유기물 함량, 토양깊이, 경운 등의 특성에 따라 달라진다. 토성별로는 사양토 1.19-1.67 Mg m⁻³, 양토 1.19-1.96 Mg m⁻³, 미사토 1.19-1.53 Mg m⁻³, 식토 0.92-1.32 Mg m⁻³ 범위를 갖는다(Hartge et al., 2016). 토성속별 용적밀도에서는 차이가 있었지만 농기계 사

Table 3. The plow pan thickness, subsoil bulk density and subsoil hardness of upland soil classified by soil textural families.

Soil textural family	Plow pan thickness (cm)	Subsoil bulk density (Mg m ⁻³)	Subsoil hardness (mm)
Sandy	16.3 ± 3.1 a	1.52 ± 0.05 ab	17.6 ± 1.9 c
Coarse loamy	18.9 ± 5.8 a	1.56 ± 0.08 a	20.2 ± 2.0 b
Fine loamy	16.8 ± 4.3 a	1.50 ± 0.10 ab	21.4 ± 2.0 ab
Fine silty	15.7 ± 5.1 a	1.46 ± 0.07 b	22.9 ± 3.0 a
Clayey	18.4 ± 4.2 a	1.47 ± 0.09 b	22.0 ± 2.7 ab

Data are means±standard deviation.

Different letters in the same column indicate significant difference according to Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

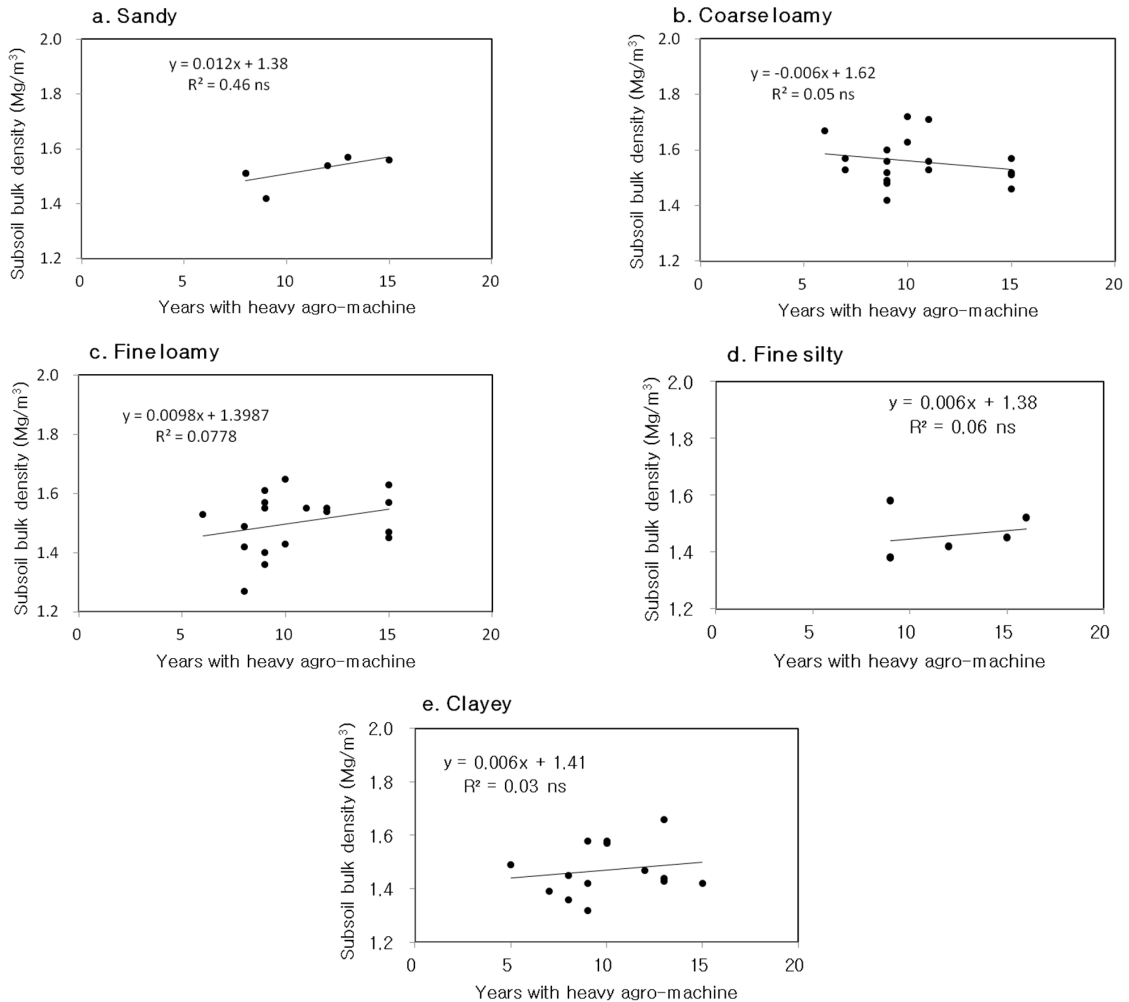


Fig. 2. The subsoil bulk density as increase of heavy agro-machine use period in different soil textural families.

용연차에 따라 용적밀도 변화는 뚜렷하게 나타나지 않았는데, 농기계에 의해 다짐이 되나 용적밀도에 대한 입자의 영향이 큰 것으로 판단된다. Keller and Hakansson (2010)은 기계적 다짐에 의한 용적밀도 변화에 대해 입경분포에 따라 달라지며, 점토함량 29.3% 일 때 최대치가 된다고 발표하였다. 다른 토양연구자들도 다짐에 의한 토양의 기계적 특성 변화는 점토함량의 범위에 따라 달라진다고 설명하였다 (Larson et al., 1980; Lebert and Horn, 1991; Smith et al., 1997; Imhoff et al., 2004). 기계적 다짐에 의한 영향이 거의 없는 사실을 제외하고 토성속별로 농기계 사용연차에 따른 심토 경도 및 경반

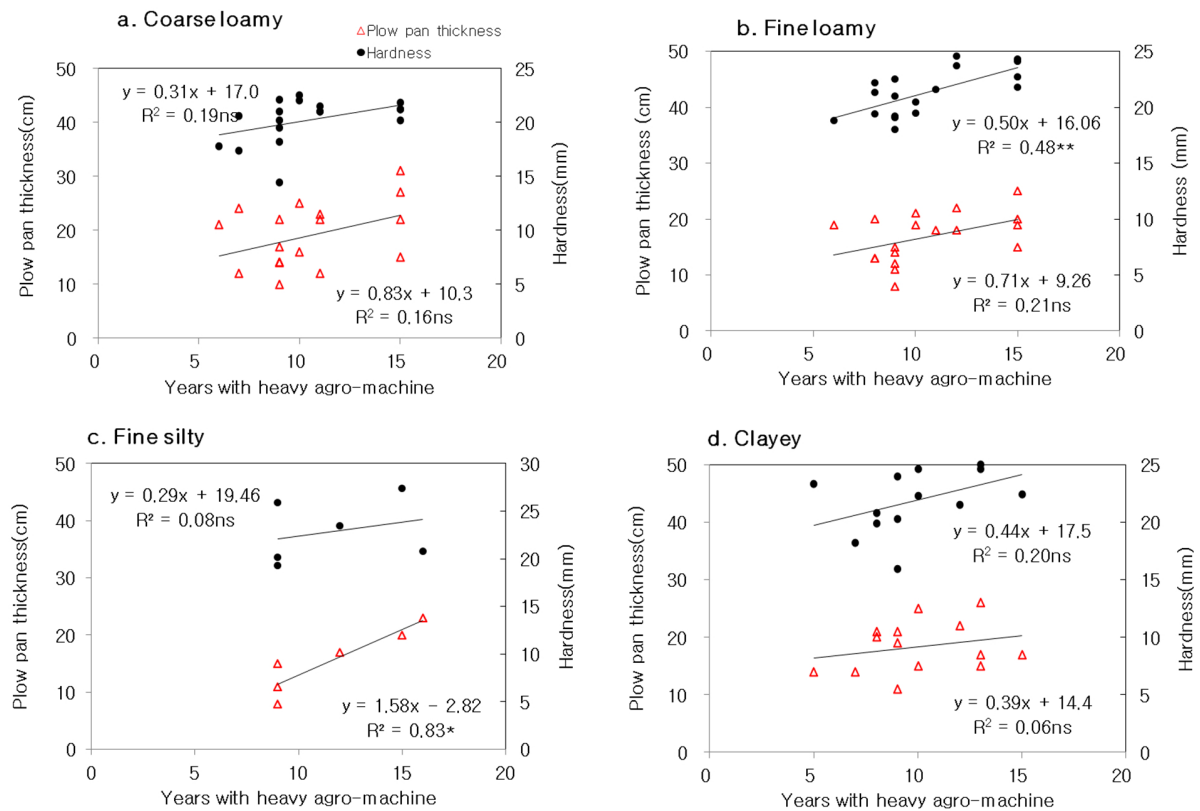


Fig. 3. The plow pan thickness and hardness of subsoil as increase of heavy agro-machine use period in different soil textural families.

층 두께의 관계를 분석하였다(Fig. 3). 농기계 사용연차에 따라 식양질에서 경도가 증가하였으며, 미사식양질에서 경반층의 두께가 증가하였고, 이 외에는 유의하지 않았다. 농기계 사용에 따른 다짐의 영향이 심토 점토함량 18-35%에서 뚜렷한 것을 볼 수 있었다. 일반적으로 입자가 작은 토양이 입자가 큰 토양보다 다짐이 잘 일어나며, 점토함량이 30% 이하에서는 점토함량이 증가함에 따라 압축지수 (compression index) 가 증가한다 (Larson et al., 1980; Imhoff et al., 2004). 점토함량에 따라 농기계 사용연차에 대한 경반층 형성 정도가 달라지며, 특히 미사식양질 토양이 취약하다는 것을 알 수 있었다.

밭 유형별 관입저항 특성과 포화수리전도도 밭 유형별로 농기계 사용연차 9년 이하 밭과 10년 이상 밭의 관입저항과 포화수리전도도를 비교하였다 (Fig. 4). 대형농기계 사용연차에 따라 관입저항의 증가가 나타났는데 사질 밭 (sandy textured) 과 중점 밭 (heavy clayey) 에서 더 뚜렷하였다. 농기계 사용연차 10년 이상의 밭에서 경반층 출현 깊이가 사질 밭에서는 20 cm 이하에서 나타났으며, 중점 밭에서는 10 cm 이하에서 나타나 사질 밭과 중점 밭에서 경반층 출현 깊이가 현저히 낮아지는 것을 볼 수 있었다. Raper (2005)의 결과에서도 농기계 하중에 의한 관입저항의 증가가 토심 30cm까지 뚜렷이 나타났다. Kim and Jo (1998)은 사과 과원의 경우 경반층이 40 cm 이하 출현시 사과 수량이 36% 감소하였다고 보고하였다. 포화수리전도도 또한 농기계 사용연차 10년 이상 밭에서 급격히 감소되었는데, 중점 밭의 경우 9년 이하 밭일 때 1.131 cm/hr 이었고 10년 이상 밭일 때 0.009 cm/hr 이었다. 투수속도가 0.1 cm/hr 미만일 때 투수등급 ‘매우느림 (very slow)’으로 정의하는데 (NIAS, 1992) 농기계 사용연차 10년 이상의 밭은 거의 불투수성을 나타내었다. Jung 등 (2016)은 우리나라 농경지에서 입자특성만으로 포화수리전도도를 설명하기에는 한계

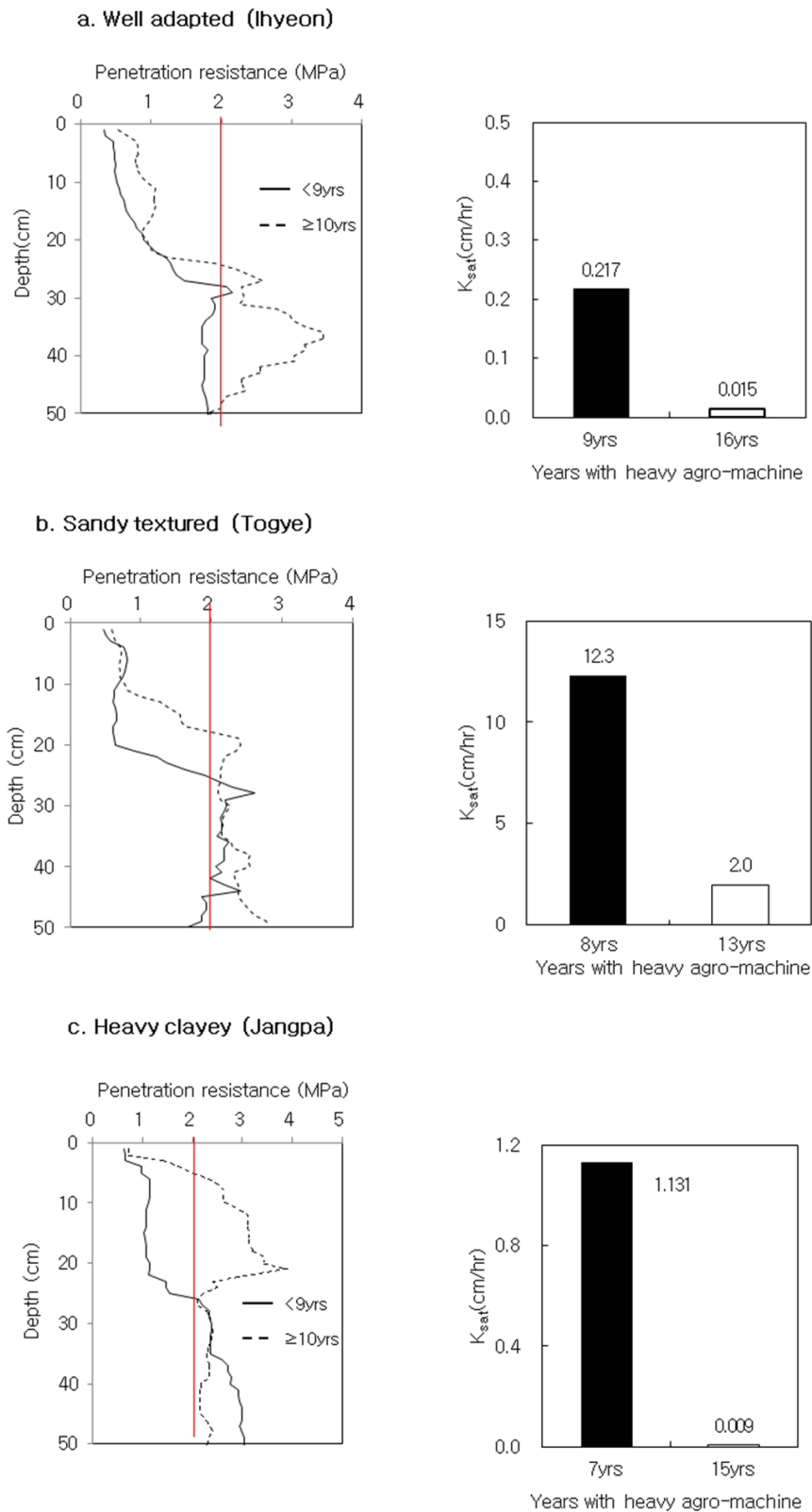


Fig. 4. The penetration resistance and saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) as increase of heavy agro-machine use period in upland soil types.

가 있으며, 대공극을 파괴하는 요인을 더 구명할 필요가 있다고 언급하였다. 포화수리전도도는 주로 대공극률과 공극의 연결성에 의해 좌우된다 (McLaren and Cameron, 1996). Schaffer (2007)는 콤팩트 10회 주행 후 대공극률과 공극 연결성이 감소된다고 밝혔다. 따라서 농기계 사용에 따른 대공극률과 공극 연결성 감소로 포화수리전도도 감소뿐만 아니라 물의 이동 및 순환에 영향이 클 것으로 보인다. 농기계 장기사용에 의해 대체로 심토 물리성이 악화되었으며, 특히 중점 밭의 경우 가장 심각하며 작물 생육 저하에 대한 취약성도 클 것으로 예상되었다.

다짐으로 물리성이 악화된 밭토양의 개선방법으로 심토파쇄, 거친 유기물 혼입, 사질토 객토, 심경 등이 있다 (Kim, 2001). 이 외에도 물질균형과 생태계 순환을 고려한 지렁이 등의 토양 동물과 목초류 등의 식물을 활용한 물리성 개선방법이 있다. 다양한 작물의 뿌리는 토양의 입단형성과 수분보유와 통기를 위한 공극분포 형성에 도움을 준다. 특히 블루그라스 등의 목초류는 뿌리밀도가 커 물리성 개선능력이 다른 작물에 비해 높다고 할 수 있다 (Kay, 1990). 생물을 이용한 물리성 개선뿐 아니라 물리성 악화를 미연에 방지하는 적절한 토양관리가 이루어지는 것이 중요하다. 한편 농기계 작업 시 토양수분상태를 고려하여 다짐의 영향을 최소화하기 위해 소성한계 이하일 때 수행하는 것이 중요하다고 볼 수 있다.

Conclusions

농기계 사용연차에 따른 토양물리성 변화를 평가하기 위하여 분포면적이 넓은 29개 토양통을 대상으로 농기계 사용 10년 이상인 지점과 9년 이하인 지점을 64개소 선정하여 경반층 특성, 경운심, 용적밀도, 공극률, 관입저항과 산중식 정도, 포화수리전도도 등을 조사하였다. 농기계 사용 10년 이상의 밭은 9년 이하의 밭에 비해 경반층 두께, 용적밀도 및 경도가 증가하고, 표토심이 감소하였다. 농기계 사용 10년 이상인 밭에서는 경반층 두께 19.8 cm, 심토 용적밀도 1.54 Mg m⁻³, 심토 경도 21.8 mm, 표토심 16.9 cm 였고, 9년 이하 밭에서는 경반층 두께 15.2 cm, 용적밀도 1.48 Mg m⁻³, 경도 19.3 mm, 표토심 18.1 cm 이었다. 특히 대형농기계의 사용연차 증가에 따라 미사식양질 (fine silty) 토양과 중점 밭 (heavy clayey)에서 경반층 두께 증가 및 포화수리전도도 감소가 뚜렷하였고, 중점 밭에서 농기계 사용 10년 이상 다짐이 되었을 때 경반층 출현 깊이가 10 cm 이하에서 나타나 경반층 출현 깊이가 현저히 낮아졌다. 농기계 사용에 대한 물리성 악화가 특히 점토함량이 높은 토양에서 취약하였고, 밭의 물리성 관리를 위해 주기적인 물리성 개선이 필요하다고 판단된다.

Acknowledgement

This study was conducted by support of NIAS, RDA research and development project (Project no. PJ01089903).

References

- Akker, J.J.H. and A. Canarache. 2001. Two European concerted actions on subsoil compaction. *Landnutzung and Landentwicklung*. 42(1):15-22.
- Alakukku, L. 2000. Responses of annual crops to subsoil compaction in a field experiment in clay soil lasting 17 years. p. 205-208. In: R. Horn et al. (ed.) *Subsoil Compaction : Distribution, Processes and Consequences*. *Advances in GeoEcology* 32. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany.
- Cho, H.R., K.H. Han, Y.S. Zhang, K.H. Jung, Y.K. Sonn, M.S. Kim, and S.Y. Choi. 2016. Threshold subsoil bulk

- density for optimal soil physical quality in upland: inferred through parameter Interactions and Crop Growth Inhibition. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 49(5):548-554.
- Cook, A., C.A. Marriott, W. Seel, and C.E. Mullins. 1996. Effects of soil mechanical impedance on root and shoot growth of *Lolium perenne* L, *Agrostis capillaris* and *Trifolium repens* L. *J. Exp. Bot.* 47:1075-1084.
- Czyz, E.A. 2004. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil Tillage Res.* 79:153-166.
- Hartge, K.H., R. Horton, R. Horn, J. Bachmann, and S. Peth. 2016. *Essential soil physics : An introduction to soil processes, functions, structure and mechanics*. Schweizerbart Science Publishers, Germany.
- Horn, R. and H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil & Tillage Research*. 102:201-208.
- 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.
- Japan soil association. 1986. *Agri-environment information system for food production : crop production environment indicator, 1st soil environment*. (in Korean, '농업환경생산정보시스템 농작물 생육환경 총지표 제 1집 토양환경'). Japan soil association, Japan.
- Jo, I.S., L.Y. Kim, D.U. Choi, J.N. Im, and K.T. Um. 1983. The effects of soil physical properties on root distribution of barley. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 16(2):126-130.
- Jo, I.S., S.J. Cho, and J.N. Im. 1977. A study on penetration of pea seedling taproots as influenced by strength of soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 10(1):7-12.
- Jung, K.H., Y.K. Sonn, S.H. Hur, K.W. Han, H.R. Cho, M.J. Seo, M.H. Jung, and S.Y. Choi. 2016. Hydraulic characteristics of arable fields in Korea and applicability of pedotransfer function. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(6):655-661.
- 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. *Geodema*. 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.
- 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.
- 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 Tillage Res.* 19:275-286.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1:277-294.
- McLaren, R.G. and K. C. Cameron. 1996. *Soil Science*. 2nd edition. Oxford University Press, Canada.
- NAS (National Institute of Agricultural Science). 2017. *Soil physical methods*. NAS, RDA, Korea.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 1992. *Introduction to Korean soil*. Soil survey document No. 13. NIAS, RDA, Korea.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2000. *Taxonomical classification of Korean soils*. NIAS, RDA, Korea.
- Raper, R.L. 2005. Agricultural traffic impacts on soil. *J. Terramechanics*. 42:259-280.

- Saqib, M., J. Akhtar, and R.H. Qureshi. 2004. Pot study on wheat growth in saline and waterlogged compacted soil I. Grain yield and yield components. *Soil Tillage Res.* 77:169-177.
- 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, M.J., K.H. Han, K.H. Jung, H.R. Cho, Y.S. Zhang, and S.Y. Choi. 2016. Effect of temperature and plow pan on water movement in monolithic weighable lysimeter with paddy sandy loam soil during winter season. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(4):300-309.
- Shierlaw, J. and A.M. Alston. 1984. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant and 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 Tillage Res.* 43:335-354.
- Unger, P.W. and T.C. Kaspar. 1994. Soil compaction and root-growth : a review. *Agron. J.* 86:759-766.
- Voorhees, W.B. 2000. Long term effects of subsoil compaction on yield of maize. p. 331-338. In: R. Horn et al. (ed.) *Subsoil Compaction : Distribution, Processes and Consequences.* Advances in GeoEcology 32. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany.