

〈Original article〉

농업적 토지이용에 따른 토양물리성 변동 평가

조희래* · 장용선 · 한경화 · 옥정훈 · 황선아 · 이협성 · 김동진

국립농업과학원 토양비료과

Decadal Changes in Subsoil Physical Properties as Affected by Agricultural Land Use Types in Korea

Hee-Rae Cho*, Yong-Seon Zhang, Kyung-Hwa Han, Jung-Hun Ok, Seon-Ah Hwang,
Hyub-Sung Lee and Dong-Jin Kim

Division of Soil & Fertilizer, National Institute of Agricultural Science, Wanju 55365, Republic of Korea

Abstract - The soil physical quality is a core factor in achieving two of sustainable agriculture's goals: productivity and environment. The purpose of this study was to assess changes in soil physical properties for nearly a decade through periodic monitoring of three cultivation types: upland, orchard, and paddy. Field surveys and lab analysis were conducted to determine the soils physical properties after every 4 years; upland (2009, 2013, and 2017), orchard (2010 and 2014), and paddy (2011 and 2015). In each year soil samples from 162-338 sites were collected. The bulk density of upland subsoil decreased from 1.53 Mg m⁻³ to 1.50 Mg m⁻³ while the plowing depth and subsoil organic matter increased from 13.7 cm to 19.5 cm and from 12.6 g kg⁻¹ to 18.3 g kg⁻¹ respectively during the period 2009-2017. Plowing depth for orchard increased from 16.7 cm to 18.9 cm. However, organic matter content decreased from 15.9 g kg⁻¹ to 15.4 g kg⁻¹ during the 2010-2014 period. For paddy, plowing depth and subsoil organic matter decreased from 17.5 cm to 16.7 cm and from 17.5 g kg⁻¹ to 15.8 g kg⁻¹ respectively. The subsoil bulk density increased from 1.47 Mg m⁻³ to 1.52 Mg m⁻³ from 2011-2015. Excess ratio for soil physical standards increased from 16% to 22% in orchard, 56% to 62% in paddy, and decreased from 41% to 29% in upland. The overall soil physical quality had been ameliorated for upland, but degraded for paddy. Improved tillage practices and application of appropriate organic matter is necessary to enhance the quality of soils, especially in the paddy field.

Keywords : soil physical properties, bulk density, hardness, tillage, compaction

서 론

작물 생산성과 농업의 지속성을 목표로 토양의 질을 평가할 수 있는 지표가 개발되어 왔다. 토양 질(soil quality)은 ‘생

물 생산의 지속성과 환경 질을 유지하며 동식물과 인간의 건강을 증진시키는 토양 기능의 크기’로 정의된다(SSSA 1984, 1996; Parr *et al.* 1992; Doran *et al.* 1994; Doran and Jones 1996; Gregorich and Carter 1997; Karlen *et al.* 1997). 따라서 생물 다양성과 생산성 지속, 물과 용질의 흐름조절과 배분, 물질의 여과, 완충, 분해와 독성경감, 물질의 저장과 순환, 생물지지 기반 제공 등을 통합적으로 고려하여 토양의

* Corresponding author: Hee-Rae Cho, Tel. 063-238-2434,
Fax. 063-238-3822, E-mail. chohr519@korea.kr

질을 평가한다(Yoon 2004). OECD는 1994년에 토양 질을 농업환경지표의 하나로 설정하였고(OECD 1999), 국내에서는 토양 질에 대한 계량화 연구를 시작하였다. 1999년에 전국 농경지를 대상으로 토양화학성 모니터링이 시작되었고(Yoon *et al.* 2003), 2007년에 토양물리성 모니터링이 시작되어 토지이용에 따라 4년 1주기로 조사를 실시하고 있다. 토양물리성 본연의 특성은 쉽게 변하지 않지만, 특히 용적밀도(bulk density)는 경운 및 수확시 농기계 종류와 운용시간, 퇴비 등 농자재 종류와 시용량 등 환경 여건의 변화에 따라 토양구조 등이 달라지고 결과적으로 토양 질을 반영하며 토양물리성 관리에 지표가 될 수 있다. 토양물리성이 좋은 토양은 토양 구조가 발달하고 토양침식 및 다짐(compaction)에 영향을 적게 받으며 토양 내 양·수분 이동 및 공기의 순환이 원활하여 작물 생육이 양호하다(Gregorich and Carter 1997). 하지만 잦은 경운과 대형 농기계 운행은 토양물리성을 악화시켜 작물생산에 부정적인 영향을 끼치는 요인으로 꼽힌다(Wallace and Terry 1998). 2009년부터 2017년까지 국내 트랙터 보유율은 약 13% 증가하였고, 이 중 60마력 이상 대형 트랙터 보유율은 40% 증가한 반면, 40마력 미만 소형 트랙터는 5% 감소하여 대형 농기계 사용이 일반화되고 있다(KOSIS 2017). 대형 농기계 사용은 심토의 다짐을 유발하며, 이전보다 더 깊게 영향이 가해진다(Shierlaw and Alston 1984). Han *et al.* (2009)은 대표 토양특성을 갖는 밭 64지점 조사결과 농기계 사용연수가 증가함에 따라 경반층 두께 증가와 포화수리전도도 감소가 뚜렷하게 나타났다고 보고하였다. Jo *et al.* (1977)은 완두뿌리와 산중식 경도와의 관계에서 산중식 경도가 증가할수록 뿌리생육이 감소하며, 24 mm가 되면 생육에 제한을 준다고 평가하였다. 한편 유기물은 입단형성을 촉진하여 토양구조를 좋게하고 유기물 함량이 증가함에 따라 용적밀도가 감소하는 등(Soane 1990; Dexter 2004; Dexter *et al.* 2005) 유기물 함량은 토양물리성에 밀접한 영향을 갖는다. 2007~2009년까지 논, 밭, 시설재배지의 토양 물리성 평가에서 유기물 함량이 높은 시설재배지에서 용적밀도가 가장 낮았고, 유기물 함량이 낮은 밭에서는 용적밀도가 높았다고 보고하였다(Cho *et al.* 2010). 이와 같은 연구를 통해 물리성 인자 간의 관계 및 토양물리성이 작물생육에 미치는 영향 등 많은 정보가 축적되었다. Cho *et al.* (2010)은 논, 밭, 시설재배지에 대한 물리성 현황을 중심으로 논하였고 국내 농경지의 토양물리성 변동에 대한 평가는 없었다. 본 연구에서는 4년 주기로 논, 밭, 과수원 등 농경지 토지이용별로 토양물리성의 변동성을 평가하고자 하였다. 심토는 표토보다 농기계 등에 의한 영향이 누적되고 복원이 쉽지 않기 때문에(Alakukku 2000; Voorhees 2000) 작토심, 심토의 용적밀도, 산중식 경도, 유기물 함량 등을 평가지표로 하였다.

재료 및 방법

1. 조사대상지 및 조사 방법

우리나라에 대표적으로 분포하는 토양통 및 토성을 고려하여 경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남 지역에서 30~40개 내외의 지점을 선정하여 밭, 과수원, 논을 대상으로 4년 주기로 토양물리성 조사를 실시하였다(Table 1). 조사시기는 토양의 수분상태가 과습(過濕), 과건(過乾) 조건을 피하여 밭과 과수원은 4월~10월 중 포장용수량 이하 조건에서, 논은 10월~3월 중 벼 수확 후 눈물이 빠진 상태에서 조사가 이루어졌으며, 밭, 과수원, 논 공통적으로 토양이 동결되지 않은 상태에서 실시되었다. 조사 및 시료채취 부위는 작물과 작물 사이를 기준으로 하되, 토지이용별로 토양물리성 조사방법에 준하였다(NAS 2017).

조사항목은 작토심(plowing depth), 심토 용적밀도, 심토 산중식 경도, 심토 유기물 함량, 토성 등이었다. 경운에 의해 토층이 분화되어 토색, 구조 등의 변화가 생기는데 이를 기준으로 토양기준면으로부터 깊이를 작토심이라 하며, 지표면에서 작토심까지를 표토(top soil), 작토심 이하를 심토(sub soil)라 하며, 본 연구에서는 심토 깊이는 50 cm 이내였다. 밭은 영농형태에 따라 이랑의 높이가 다양하기 때문에 이랑과 고랑의 1/2 지점을 기준면으로 작토심을 구하였다. 작토심을 기준으로 아래를 심토로 하며, 작토심의 약 2~5 cm 아래에서 산중식 경도계(DIK-5553, strength of spring 78.4N/40 mm, cone angle 25°, 20', Japan)를 이용하여 10만복 측정하여 심토 산중식 경도를 구하였고, 100 cm³ 코어를 이용하여 3만복으로 시료를 채취하여 심토 용적밀도를 측정하였으며, 심토 유기물 함량 및 토성은 토양 및 식물체 분석법에 준하여 분석하였다(NIAST 2000).

2. 주기 간 토양물리성의 비교

첫 번째로 토지이용별로 농경지에 대한 주기별 토양물리성 평균을 비교하였고, 두 번째 단계로 점토함량에 따라 다져

Table 1. Investigated points according to land use types and investigated period

Land use types	Investigated year (number of sampling points)
Upland	2009 (162)
	2013 (286)
	2017 (331)
Orchard	2010 (258)
	2014 (304)
Paddy	2011 (230)
	2015 (338)

Table 2. Periodic changes of soil physical properties for upland soil

Subsoil clay content	Indicators	2009	2013	2017
Total upland	Plowing depth (cm)	13.7 ± 3.5c	15.8 ± 4.1b	19.5 ± 6.4a
	Subsoil bulk density (Mg m ⁻³)	1.52 ± 0.16ab	1.53 ± 0.11a	1.50 ± 0.13b
	Subsoil hardness (mm)	19.1 ± 4.5b	19.3 ± 3.2b	20.3 ± 4.0a
	Subsoil organic matter (g kg ⁻¹)	14.4 ± 8.9b	12.6 ± 8.9b	18.3 ± 10.9a
< 18%	Plowing depth (cm)	13.1 ± 2.8c	16.0 ± 4.0b	18.9 ± 6.7a
	Subsoil bulk density (Mg m ⁻³)	1.51 ± 0.15ab	1.54 ± 0.11a	1.50 ± 0.13b
	Subsoil hardness (mm)	17.6 ± 4.1c	18.0 ± 3.3b	20.2 ± 4.1a
	Subsoil organic matter (g kg ⁻¹)	13.6 ± 7.9b	12.8 ± 9.7b	17.7 ± 10.6a
≥ 18%	Plowing depth (cm)	14.9 ± 4.3b	15.4 ± 4.2b	20.9 ± 5.3a
	Subsoil bulk density (Mg m ⁻³)	1.53 ± 0.18	1.52 ± 0.11	1.50 ± 0.13
	Subsoil hardness (mm)	21.6 ± 3.9a	19.9 ± 3.0b	20.8 ± 3.7ab
	Subsoil organic matter (g kg ⁻¹)	15.5 ± 10.4b	12.3 ± 7.4c	19.7 ± 11.2a

Data are means ± standard deviation.

Different letters in the same row indicate significant difference at $p < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test.

Table 3. The excess ratio of recommended subsoil bulk density for upland soil

	2009	2013	2017	Recommended ^a
Total upland	41	38	29	
Subsoil clay content < 18%	20	16	14	< 1.6
Subsoil clay content ≥ 18%	21	22	15	< 1.5

^aRecommended means subsoil bulk density for optimal soil physical quality for upland.

지는 특성이 달라지는 점을 고려하여 심토의 점토함량을 기준으로 점토함량이 18% 이하인 '사양질', 점토함량이 18% 이상인 '식양질'의 두 그룹으로 나누어 비교하였다. 주 기간 토양물리성의 평균 간 비교를 위해 통계분석은 SAS 통계 프로그램을 이용하였으며 (SAS, ver. 9.2, Cary, NC), 2주기 조사가 이루어진 논, 과수원은 t-test, 3주기 조사가 이루어진 밭은 GLM (generalized linear model)으로 검정 후 Duncan's Multiple Range test를 이용하여 5%에서 통계적 유의성을 검정하였다. 또한 토지이용별로 물리성 개량 기준을 초과하는 지점의 비율을 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 밭 토양 물리적 특성 변화

밭 작토심 평균은 2009년에 13.7 cm, 2013년에 15.8 cm, 2017년에 19.5 cm, 심토 유기물 함량은 12.6 g kg⁻¹ (2013)에서 18.3 g kg⁻¹ (2017)로, 심토 산중식 경도는 19.3 mm (2013)에서 20.3 mm (2017)로 증가하였고, 심토 용적밀도는 1.53 Mg m⁻³ (2013)에서 1.50 Mg m⁻³ (2017)로 감소하였다 (Table 2). 심토 점토함량에 따라 그룹을 나누었을 때, 심토 점토함량 18% 미만인 그룹 (사양질)에서도 같은 경향이었고, 18% 이상인 그룹 (식양질)에서는 작토심은 14.9 cm (2009)에서 20.9

cm (2017)로, 유기물 함량은 15.5 g kg⁻¹ (2009)에서 19.7 g kg⁻¹ (2017)로 증가하였으나, 용적밀도는 주기 간 유의적인 차이는 나타나지 않았다 (Table 2). 밭 토양 물리성 개량기준은 사양질일 때 심토 용적밀도 1.6 Mg m⁻³ 미만, 식양질일 때 심토 용적밀도 1.5 Mg m⁻³ 미만으로 (Cho *et al.* 2016), 이 기준을 적용하였을 때 적정기준을 초과하는 지점이 41% (2009), 38% (2013), 29% (2017)로 점점 줄어들고 있으며, 2017년 초과지점 비율은 사양질, 식양질 각각 약 15%로 비슷하게 나타났다 (Table 3). 특히 개량기준 초과 비율이 식양질에서 감소하였는데, 이는 식양질의 심토 용적밀도의 주기간 변화는 없었지만 1.5 Mg m⁻³ 이상의 분포비율이 감소한 것에서 비롯된 것으로 해석된다 (Fig. 1b). 사양질에서도 1.5 Mg m⁻³ 이상의 분포 비율이 감소하였으며, 전체적으로 밭의 다짐 상태가 4년 전보다 완화되었다 (Fig. 1a). 2013년에 비하여 2017년에 작토심이 깊어지고 심토 유기물 함량이 증가하고 심토 용적밀도가 낮아졌다.

2. 과수원 토양 물리적 특성 변화

과수원의 작토심 평균은 16.7 cm (2010)에서 18.9 cm (2014)로 증가하고, 심토 산중식 경도는 19.8 mm (2010)에서 19.2 mm (2014), 심토 유기물 함량은 15.9 g kg⁻¹ (2010)에서 15.4 g kg⁻¹ (2014)로 감소하였으며, 심토 용적밀도는 유의적인 차

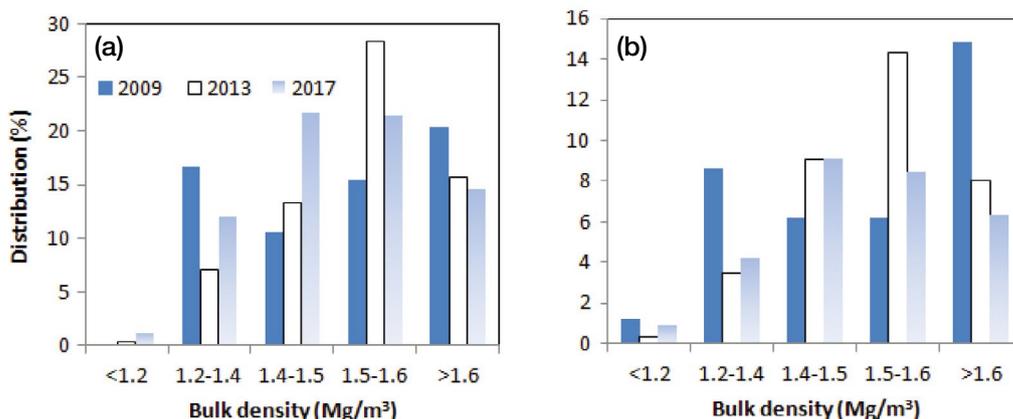


Fig. 1. The distribution of subsoil bulk density for upland; (a) Group of <18% subsoil clay content and (b) group of ≥18% subsoil clay content.

Table 4. Periodic changes of soil physical properties for orchard soil

Subsoil clay content	Indicators	2010	2014
Total orchard	Plowing depth (cm)	16.7 ± 8.1b	18.9 ± 10.0a
	Subsoil bulk density (Mg m ⁻³)	1.41 ± 0.13	1.46 ± 0.13
	Subsoil hardness (mm)	19.8 ± 3.1a	19.2 ± 3.6b
	Subsoil organic matter (g kg ⁻¹)	15.9 ± 8.4a	15.4 ± 10.9b
<18%	Plowing depth (cm)	15.5 ± 7.6b	18.2 ± 10.7a
	Subsoil bulk density (Mg m ⁻³)	1.42 ± 0.13	1.48 ± 0.12
	Subsoil hardness (mm)	19.1 ± 3.0	18.4 ± 3.3
	Subsoil organic matter (g kg ⁻¹)	13.6 ± 7.4b	14.4 ± 9.9a
≥18%	Plowing depth (cm)	17.9 ± 8.5	20.1 ± 8.6
	Subsoil bulk density (Mg m ⁻³)	1.41 ± 0.13	1.45 ± 0.13
	Subsoil hardness (mm)	20.5 ± 3.0b	20.5 ± 3.7a
	Subsoil organic matter (g kg ⁻¹)	18.3 ± 8.7a	16.9 ± 12.2b

Data are means ± standard deviation.

Different letters in the same row indicate significant difference at *p* < 0.05 level according to Duncan's multiple range test.

Table 5. The excess ratio of recommended subsoil bulk density for orchard soil

	2010	2014	Recommended ^a
Total orchard	16	22	
Subsoil clay content <18%	5	9	<1.6
Subsoil clay content ≥18%	11	13	<1.5

^aRecommended means subsoil bulk density for optimal soil physical quality for orchard.

이는 없었으나 증가하는 경향이였다 (Table 4). 사양질에서 작 토심이 15.5 cm (2010)에서 18.2 cm (2014)로 증가하고, 심토 유기물 함량이 사양질에서 13.6 g kg⁻¹ (2010)에서 14.4 g kg⁻¹ (2014)로 증가하였으나, 식양질에서는 18.3 g kg⁻¹ (2010)에서 16.9 g kg⁻¹ (2014)로 감소하였다 (Table 4). Zhang *et al.* (2018)에 의하면 사과 등 주요 과수에 대한 토양물리성 적정기준은 토성별로 사양질은 심토 용적밀도 1.6 Mg m⁻³ 미만, 식양질은 심토 용적밀도 1.5 Mg m⁻³ 미만으로, 이 기준을 적용하였을

때 적정기준을 초과하는 지점이 16% (2010)에서 22% (2014)로 증가하였다 (Table 5). 2010년에는 1.2~1.4 Mg m⁻³ 범위에 40% 이상 분포하였으나, 2014년에는 1.2~1.6 Mg m⁻³에 고 르게 분포하며 개량기준 초과비율이 증가하였다 (Fig. 2).

3. 논 토양 물리적 특성 변화

논의 작토심 평균은 2011년에 17.5 cm, 2015년에 16.7 cm

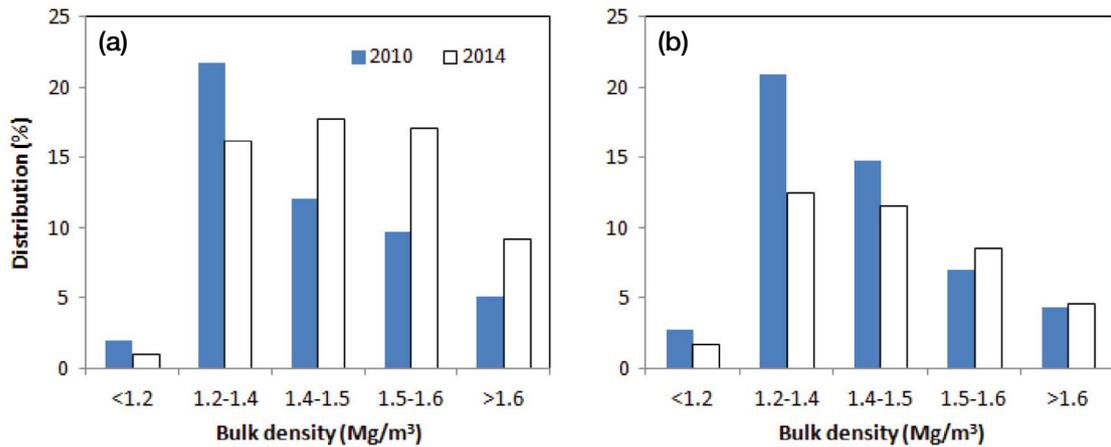


Fig. 2. The distribution of subsoil bulk density for orchard; (a) group of <18% subsoil clay content and (b) group of ≥18% subsoil clay content.

Table 6. Periodic changes of soil physical properties for paddy soil

Subsoil clay content	Indicators	2011	2015
Total paddy	Plowing depth (cm)	17.5 ± 6.0a	16.7 ± 3.5b
	Subsoil bulk density (Mg m ⁻³)	1.47 ± 0.18b	1.52 ± 0.13a
	Subsoil hardness (mm)	20.3 ± 3.6	20.9 ± 3.5
	Subsoil organic matter (g kg ⁻¹)	17.5 ± 9.3a	15.8 ± 7.9b
< 18%	Plowing depth (cm)	16.6 ± 4.7a	16.2 ± 3.0b
	Subsoil bulk density (Mg m ⁻³)	1.48 ± 0.18b	1.55 ± 0.12a
	Subsoil hardness (mm)	20.5 ± 4.0	20.9 ± 3.8
	Subsoil organic matter (g kg ⁻¹)	17.5 ± 10.0a	15.9 ± 7.8b
≥ 18%	Plowing depth (cm)	18.7 ± 7.3a	17.1 ± 3.9b
	Subsoil bulk density (Mg m ⁻³)	1.45 ± 0.18b	1.49 ± 0.13a
	Subsoil hardness (mm)	20.1 ± 3.2	21.0 ± 3.2
	Subsoil organic matter (g kg ⁻¹)	17.4 ± 8.6	15.6 ± 8.1

Data are means ± standard deviation.

Different letters in the same row indicate significant difference at $p < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test.

로, 심토 유기물 함량은 17.5 g kg⁻¹ (2011)에서 15.8 g kg⁻¹ (2015)로 감소하였고, 심토 용적밀도는 1.47 Mg m⁻³ (2011)에서 1.52 Mg m⁻³ (2015)로 증가하였으며, 심토 산중식 경도는 유의한 차이가 없었다(Table 6). 심토 점토함량에 따라 나누었을 때, 사양질은 16.6 cm (2011)에서 16.2 cm (2015), 식양질은 18.7 cm (2011)에서 17.1 cm (2015)로 작토심이 감소하고, 사양질은 1.48 Mg m⁻³ (2011)에서 1.55 Mg m⁻³ (2015), 식양질은 1.45 Mg m⁻³ (2011)에서 1.49 Mg m⁻³ (2015)로 용적밀도는 증가하였다(Table 6). 심토 유기물 함량은 사양질, 식양질 모두 전체 평균치와 비슷한 수준으로 감소하였다. 한편 논 토양 물리성 개량기준은 심토 용적밀도 (<1.4 Mg m⁻³)와 심토 산중식 정도 (<20 mm)를 지표로 하는데 (Kim *et al.* 2013), 심토 용적밀도는 70% (2011)에서 81% (2015), 산중식 정도는 56% (2011)에서 62% (2015)로 초과지점 비율이 증

Table 7. The excess ratio of recommended subsoil bulk density and subsoil hardness for paddy soil

	2011	2015	Recommended ^a
Subsoil BD	70	81	<1.4
Subsoil hardness	56	62	<20

^aRecommended means subsoil bulk density and subsoil hardness for optimal soil physical quality for paddy soil.

가하였다(Table 7). 토성별로는 사양질보다 식양질에서 증가하는 경향이였다(Figs. 3, 4). Min *et al.* (1983)은 용적밀도와 정도 증가 시 벼 뿌리밀도 및 수확량이 감소한다고 보고하였다.

밭에서는 2009, 2013, 2017년의 주기적인 변동에서 작토심이 깊어지고 심토 유기물 함량은 높아지고 심토 용적밀도

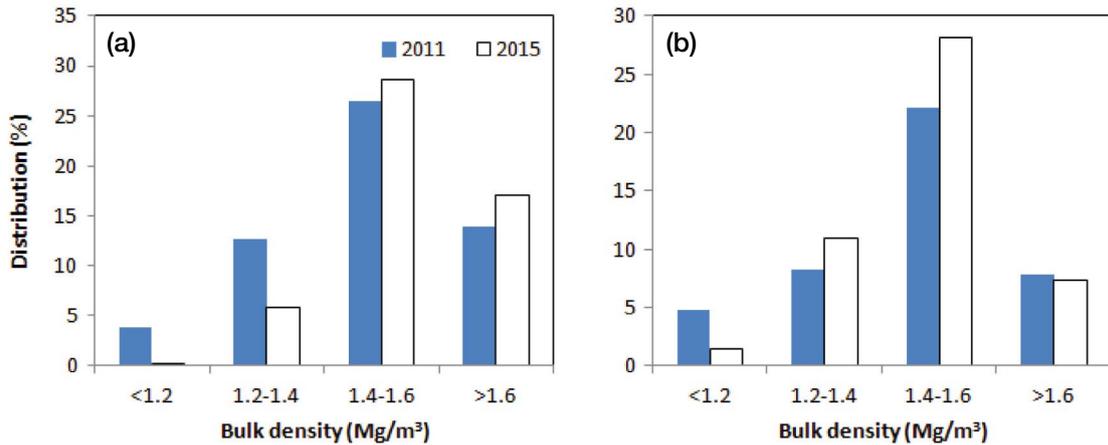


Fig. 3. The distribution of subsoil bulk density for paddy; (a) group of <18% subsoil clay content and (b) group of ≥18% subsoil clay content.

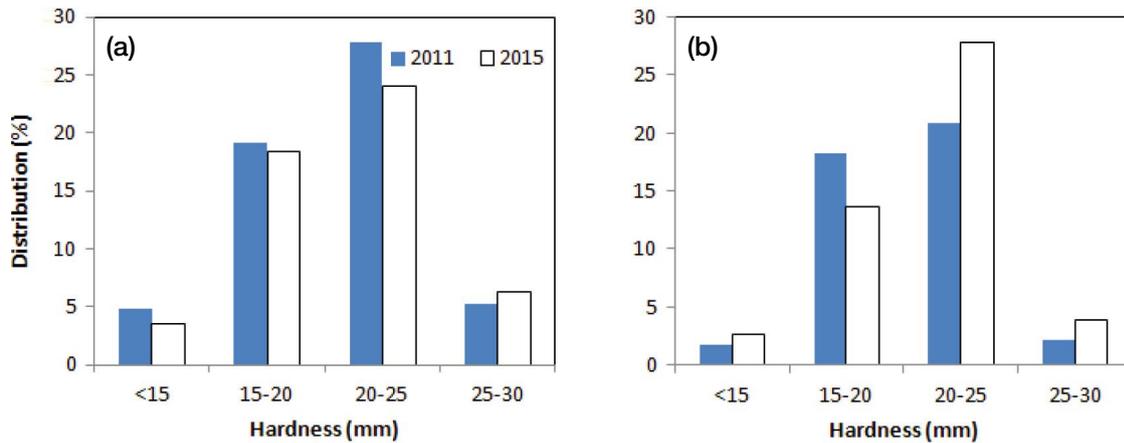


Fig. 4. The distribution of subsoil hardness for paddy; (a) group of <18% subsoil clay content and (b) group of ≥18% subsoil clay content.

는 감소하는 양상을 보이며, 토양 물리성이 양호해지고 있었다. 한편 과수원에서는 2010년보다 2014년에 작토심은 깊어지고 심토 산중식 경도는 작아졌으나, 심토 유기물 함량은 감소하고 심토 용적밀도는 증가하는 경향으로 항목별로 토양 물리성 양상이 다르게 나타났다. 반면, 논에서는 2011년보다 2015년에 토양 물리성이 불량해지는 경향이 종합적으로 나타났다. 1주기 때 비해 2주기 때 작토심, 심토 유기물 함량이 감소하고 심토 용적밀도는 증가하였으며, 물리성 적정기준 초과비율이 50% 이상으로 1주기에 비해 2주기에 증가하였다. 최근 10년 토양물리성 변화에 있어 밭은 물리성이 양호해지고 있는 반면 논은 물리성이 나빠졌다는 것을 볼 수 있었다. 최근 노동력 절감을 위해 논에서 경운작업을 생략하고 답수상태에서 물 로타리 후 이앙작업을 하는 것이 일반화되고 있다. 이와 같은 방식(물 로타리)과 경운 후 로타리 기계

이양하는 관행경운(표준경운, 대조구) 비교 실험 결과, 5년차까지는 대조구와 물 로타리 처리구에서 물리성 및 수량이 비슷하였으나, 6년차에 물 로타리 처리구에서 용적밀도가 증가하고 수량이 대조구에 비해 7% 감소하는 결과를 보였다 (Yang *et al.* 2005). 또한 벼 뿌리 분포가 깊이별로 다르게 나타났는데, 0~10 cm에서는 로타리 처리구가 더 많은 반면, 10~25 cm에서는 표준경운 처리구가 더 많았다 (Shin *et al.* 1992; Yang *et al.* 2005). 짧은 기간 경운작업을 간소화 작업으로 논 토양 물리성 및 수량에 영향이 나타나지 않아도 6년 이상 지속될 경우 토양물리성이 불량해지고 수량도 감소되는 것을 알 수 있었다. 한편 2001~2002년 남부지역 90필지 경운실태 조사결과, 트랙터 경운이 87%로 대부분이었으며, 위탁경운이 59%로 자가경운에 비해 많았고 위탁경운은 자가경운에 비해 얇게 경운하는 경향이 있었다 (Yun *et al.* 2005).

본 연구에서 대상 경작지에 대한 경운방법 조사가 이루어지지 않았으나, 선행 연구결과로 미루어 볼 때, 대형농기계가 발달하고 많이 보급되고 있으나 논에서 위탁경운이 많아지면서 경운심이 얕아지고 심토 용적밀도 증가 등으로 토양물리성 불량해진 것으로 사료된다.

농기계는 단단한 토양구조를 해소하여 뿌리생육 깊이를 확장해주고 농작업을 용이하게 하는 한편 심토 다짐을 유발하는 등 양단면을 갖는다(Shierlaw and Alston 1984). 특히 농기계 운행시 토양수분상태에 따라 다짐의 정도가 달라지는데, 토양수분이 많아지면 다짐에 취약해진다(Lipiec *et al.* 2002). 토양에 물을 가하면 소성이 생기며 어느 정도 이상의 수분상태에서는 형태를 유지하지 못하고 유동상태로 변화되는데 균열이 생기지 않으며 변형을 유지할 수 있는 최소한의 수분함량을 소성한계(plastic limit)라고 한다. 소성한계는 점토함량이 높을수록 높고 점토광물의 종류에 따라 달라지는 특성이다. 농기계 운행에 적합한 수분상태는 소성한계 이하이며(Spoor and Godwin 1978), Allmaras *et al.* (1969)은 다짐에 대한 취약성을 최소화할 수 있는 토양수분상태를 소성한계의 0.95배라고 밝혔다. 따라서 다짐의 취약성을 피하기 위해서 토양특성에 따른 소성한계를 고려하여 농기계 작업을 하는 것이 중요하다.

밭, 과수원, 논 공통적으로 심토 유기물 함량 변동과 심토 용적밀도 변동이 상반되게 나타났는데, 이는 유기물 함량이 증가함에 따라 용적밀도가 감소한다는 것과 일치하는 결과이다(Soane 1990; Dexter 2004; Dexter *et al.* 2005). 적정 수준의 유기물은 토양구조를 안정화시켜 물리성의 퇴화를 막아주기 때문이다(Cochrane and Aylmore 1994; Thomas *et al.* 1996). 유기물의 형태에 따라 물리성에 미치는 영향은 달라지는데, 부식이 덜 된 유기물은 공극률 증가 및 경도 감소에 영향을 끼친다(Zhang 1994). 논 장기연용 시험연구에서 벧짚 및 벧짚퇴비 시용구가 무시용구에 비해 용적밀도 및 입단화도가 높아졌으며(Hwang *et al.* 2013), 59년 장기연용 논에서 벧짚퇴비 시용구에서 유기탄소 함량이 표토에서는 1.4배, 심토에서는 2배 가량 높아졌다(Kim *et al.* 2012). 논은 답수상태를 유지하기 때문에 벧짚 잔재물 등 유기물질이 환원되면 침투수와 함께 심토로 용탈되어 심토의 유기탄소 함량이 높아지기 때문이다(Katoh *et al.* 2005). 토양 중 유기물 축적의 안정적인 수준을 유지하면서 물리성을 개선하기 위해서는 장기적인 퇴비의 투입이 중요하며, 벧짚이 우수한 퇴비로 평가되었다. 그러나 가축 사료로 사용되면서 논으로 벧짚 환원이 이루어지지 않고 있으며, 95년 이후 토양 유기물의 축적이 되지 않는 원인으로 발표되었다(Kim *et al.* 2010). 최근 가축분뇨 자원화 정책으로 퇴·액비가 농경지 투입이 많아지고 유기물과 무기물의 공급원으로 토양의 이화학적 개선

및 생물상의 활성증진에 효과가 있는 것으로 보고되었으나(Khaleel 1981; Ndayegamiye 1989; Billie 1998), 사용량 및 사용방법, 부숙도, 사용시기 등에 따라 가스발생, 악취 등 환경부하를 고려하여 사용되어야 할 것이다. 농촌진흥청(2006)은 작물별 시비처방기준에 가축분퇴비를 시용할 경우, 퇴구비 표준시비량을 기준으로 우분톱밥 퇴비는 동일량, 돈분톱밥 퇴비는 22%, 계분톱밥 퇴비는 17% 해당량을 추천하였다. Yang *et al.* (2008)은 논에서 돈분액비 시용 후 무경운시 벧짚을 피복하거나 로타리 경운을 하면 양분유실량이 현저히 줄고 청보리 수량도 무경운 대비 49% 증수한다고 보고하였다.

이상에서 토성, 경운방법, 유기물 투입활동 등이 복합적으로 작용하여 토양의 물리성을 결정하며 장기적으로 작용하였을 때 특성이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이 중 경운, 유기물 투입 등은 조절할 수 있는 인자이기 때문에 물리성이 나빠지는 것으로 나타났던 논의 물리성 개선을 위해 경운 후 로타리, 깊이 경운하기 등 경운방법을 개선하고 적정량의 유기물을 사용하는 관리가 지속적으로 필요하겠다.

적 요

토지이용별로 토양 물리성 변화를 평가하기 위하여 2009년부터 2017년까지 전국의 밭, 과수원, 논을 대상으로 토양 물리성 특성을 4년 주기로 분석하였다. 밭은 작토심, 심토 유기물 함량, 심토 산중식 경도가 증가하고 심토 용적밀도가 감소하며, 개량기준 초과비율도 지속적으로 감소하였다. 과수원은 경운심이 증가하였으나 심토 유기물 함량이 감소하고 적정기준을 초과하는 비율은 4년 전보다 증가하였다. 논은 작토심, 심토 유기물 함량이 감소하고 심토 용적밀도가 증가하며 개량기준 초과비율이 증가하는 등 물리성 불량이 심화되었다. 최근 10년간 밭, 과수원에 비해 논의 물리성이 악화되는 것을 확인할 수 있었으며, 공통적으로 심토 유기물 함량이 감소하고 심토 용적밀도가 증가하는 주요한 요인은 토양유기물로 평가되었다. 따라서 토양물리성 질 관리에 유기물은 중요한 요소이었으며, 특히 논에서 지속적인 유기물 관리와 경운방법 개선 등이 필요하다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01250503)의 지원에 의해 이루어졌습니다.

REFERENCES

Alakukku L. 2000. Responses of annual crops to subsoil com-

- paction in a field experiment in clay soil lasting 17 years. pp. 205–208. In *Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences* (Horn *et al.* eds.). *Advances in GeoEcology* 32. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany.
- Allmaras RR, RE Burwell and RF Holt. 1969. Plow layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. *Soil Sic. Soc. Am. Proc.* 31:550–556.
- Billie JL and JL Terry. 1998. Field response of soil physical properties to sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 27:534–542.
- Cho HR, HJ Cho, KY Jung, JH Ryu, SG Ha, KH Han, SH Jeon, HJ Jeon, AS No, SJ Lim, JI Lee, BK Ahn, BH Kim, YJ Seo and JH Park. 2010. Soil physical properties under different arable land use types. *Proceedings of 2010 Korean Soil & Fertility Conference.* 139–140.
- Cho HR, KH Han, YS Zhang, KH Jung, YK Sonn, MS Kim and SY Choi. 2016. Threshold subsoil bulk density for optimal soil physical quality in upland: inferred through parameter interactions and crop growth inhibition. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:548–554.
- Cochrane HR and LAG Aylmor. 1994. The effects of plant roots on soil structure. pp. 207–212. In *Proceedings of 3rd Triennial Conference Soils* 94.
- Dexter AR. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120:201–214.
- Dexter AR, EA Czyz, M Birkás, E Diaz-Pereira, E Dumitru, R Enache, H Fleige, R Horn, K Rajkaj, D De La Rosa and C Simota. 2005. SIDASS project, Part 3. The optimum and the range of water content for tillage-further developments. *Soil Tillage Res.* 82:29–37.
- Doran JW and AJ Jones. 1996. Methods for assessing soil quality. *Soil Science Society of America Special Publication* 49. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Doran JW, DC Coleman, DF Bezdicek and BA Stewart. 1994. Defining soil quality for a sustainable environment. *Soil Science Society of America Special Publication* 35. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Gregorich EG and MR Carter. 1997. *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health.* Elsevier, NY, USA.
- Han KW, LY Kim, SW Hwang, HJ Cho, SS Kang, SO Hur, DS Oh, GS Lee and HS Lee. 2009. Compacted soil physical properties on arable land. pp. 519–534. In *Agro-Environment Research Report.* National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Hwang SA, HS Bae, SH Lee, JG Kang, HK Kim and KB Lee. 2013. Changes of soil properties and rice quality by long-term application of rice straw and rice straw compost in paddy field. *J. Agric. Life Sci.* 44:65–70.
- Jo IS, SJ Cho and JN Im. 1977. A study on penetration of pea seedling taproots as influenced by strength of soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 10:7–12.
- Karlen DL, MJ Mausbach, JW Doran, RG Cline, RF Harris and GE Schuman. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4–10.
- Katoh M, MJ urase, A Sugimoto and M Kimura. 2005. Effect of rice straw amendment on dissolved organic and inorganic carbon and cationic nutrients in percolating water from a flooded paddy soil: A microcosm experiment using C-13-enriched rice. *Org. Geochem.* 36:803–811.
- Khaleel R, KR Reddy and MR Overcash. 1981. Changes in soil physical properties due to organic waste applications. A review. *J. Environ. Qual.* 10:133–141.
- Kim LY, HJ Cho, SD Hong and HS Lee. 2013. Amelioration guideline of soil physical properties in paddy rice fields based on soil survey of dominant soil series in Korea. *Korean J. Agri. Sci. Chungbuk Nat'l Univ.* 29:49–54.
- Kim MS, WI Kim, JS Lee, GJ Lee, GL Jo, MS Ahn, SC Choi, HJ Kim, YS Kim, MT Choi, YH Moon, BK Ahn, HW Kim, YJ Seo, YH Lee, JJ Hwang, YH Kim and SK Ha. 2010. Long-term monitoring study of soil chemical contents and quality in paddy fields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:930–936.
- Kim MS, YH Kim, SS Kang, HB Yun and BK Hyun. 2012. Long-term application effects of fertilizers and amendments on changes of soil organic carbon in paddy soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:1108–1113.
- KOSIS. 2017. *Census of agriculture, forestry and fisheries.* Korean Statistical Information Service. Daejeon, Korea.
- Lipiec J, A Ferrero, V Giovanetti, A Nosalewicz and M Tur-ski. 2002. Response of structure to simulated trampling of woodland soil. *Adv. Geocol.* 35:133–140.
- Min KB, JJ Kim, SJ Cho and JN Im. 1983. The effects of subsoiling at different depths and spacings on physical properties of soil and rice yields. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 16:228–234.
- NAS. 2017. *Soil physical methods.* National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju, Korea.
- Ndayegamiye C. 1989. Effect of long-term pig slurry and solid cattle manure application on soil chemical and biological properties. *Can. J. Soil Sci.* 69:39–47.
- NIAST. 2000. *Methods of soil and plant analysis.* National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- NIAST. 2006. *Fertilization standard of crop plants.* National In-

- stitute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- OECD. 1999. Environmental indicators for agriculture. Vol. 1. Concepts and frame work. Head of Publication Service, OECD Publications Service, Paris, France.
- Parr JF, RI Papendisk, SB Hornick and RE Meyer. 1992. Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Am. J. Altern. Agric.* 7:5–11.
- Shierlaw J and AM Alston. 1984. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant Soil* 77:15–28.
- Shin BW, CH Yoo, SB Lee and JS Kim. 1996. Effect of tillage methods on soil physiochemical properties and rice yield in paddy soil. pp. 406–411. Research Report. National Institute of Crop Science (NICS), RDA, Iksan, Korea.
- Soane BD. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil Tillage Res.* 16:179–201.
- SSSA. 1984. Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of American, Madison, Wi, USA.
- SSSA. 1996. Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of American, Madison, Wi, USA.
- Spoor G and RJ Godwin. 1978. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *J. Agric. Eng. Res.* 23:243–258.
- Thomas GW, GR Haszler and RI Blevins. 1996. The effect of organic matter and tillage on maximum compactibility of soils using the proctor test. *Soil Sci.* 161:502–508.
- Voorhees WB. 2000. Long term effects of subsoil compaction on yield of maize. pp. 331–338. In *Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences* (Horn *et al.* eds.). *Advances in GeoEcology* 32. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany.
- Wallace A and RE Terry. 1998. Soil conditioners, soil quality and soil sustainability. pp. 1–41. In *Handbook of Soil Conditioners* (Wallace A and RE Terry eds.). Marcel Dekker, NY, USA.
- Yang CH, SB Lee, TK Kim, JH Ryu, CH Yoo, JJ Lee, JD Kim and KY Jung. 2008. The effect of tillage methods after application of liquid pig manure on silage barley growth and soil environment in paddy field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41:285–292.
- Yang WH, HS Han, WT Jeon, CI Yang, BS Lee, YH Yoon, DH Choi and JW Park. 2005. Improvement of technology on machine transplanting of rice. III. Development of technology on machine transplanting of partial-tillage of rice. *Treat. Crop Sci.* 6:292–301.
- Yoon JH. 2004. Review and discussion on development of soil quality indicators. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37:192–198.
- Yoon JH, LY Kim, PK Jung, JS Suh and HJ Jun. 2003. Development of soil quality indicators. pp. 240–258. In *Agro-Environment Research Report for 2002*. NIAST, RDA, Suwon, Korea.
- Yun ES, KY Jung, IS Son, JK Kim, CS Kim and ST Park. 2005. Genesis of subsoil compaction in multi-use paddy soils. pp. 499–511. In *Research Report*. National Institute of Crop Science (NICS), RDA, Miryang, Korea.
- Zhang H. 1994. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. *Soil Tillage Res.* 31:263–275.
- Zhang YS, KH Han, HR Cho, JH Ok, SA Hwang and KH Jung. 2018. Optimum range on soil physical indicators under Orchard Lands. *Proceedings of 2018 Korean Soil & Fertility Conference*. p. 61.

Received: 23 November 2018

Revised: 5 December 2018

Revision accepted: 6 December 2018