

Threshold Subsoil Bulk Density for Optimal Soil Physical Quality in Upland: Inferred Through Parameter Interactions and Crop Growth Inhibition

Hee-Rae Cho, Kyung-Hwa Han*, Yong-Seon Zhang, Kang-Ho Jung, Yeon-Kyu Sonn,
Myeong-Sook Kim, and Seyeong Choi¹

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

¹Extension Planning Division, Gyeongsangbuk-do Agricultural Research & Extension Services, Daegu 41404, Korea

(Received: September 20 2016, Revised: October 27 2016, Accepted: October 28 2016)

Optimal range of soil physical quality to enhance crop productivity or to improve environmental health is still in dispute for the upland soil. We hypothesized that the optimal range might be established by comparing soil physical parameters and their interactions inhibiting crop growth. The parameter identifying optimal range covered favorable conditions of aeration, permeability and root extension. To establish soil physical standard two experiments were conducted as follows; 1) investigating interactions of bulk density and aeration porosity in the laboratory test and 2) determining effects of soil compaction and deep & conventional tillage on physical properties and crop growth in the field test. The crops were *Perilla frutescens*, *Zea mays L.*, *Solanum tuberosum L.* and *Secale cereael*. The saturated hydraulic conductivity, bulk density from the root depth, root growth and stem length were obtained. Higher bulk density showed lower aeration porosity and hydraulic conductivity, and finer texture had lower threshold bulk density at 10% aeration bulk density. Reduced crop growth by subsoil compaction was higher in silt clay loam compared to other textures. Loam soil had better physical improvement in deep rotary tillage plot. Combined with results of the present studies, the soil physical quality was possibly assessed by bulk density index. Threshold subsoil bulk density as the upper value were 1.55 Mg m⁻³ in sandy loam, 1.50 Mg m⁻³ in loam and 1.45 Mg m⁻³ in silty clay loam for optimal soil physical quality in upland.

Key words: Threshold bulk density, Optimal soil physical quality, Crop growth inhibition, Subsoil compaction

Threshold subsoil bulk density for optimal soil physical quality.

Soil physical Index	Sandy Loam	Loam	Silty Clay Loam
	----- Mg m ⁻³ -----		
Bulk density	< 1.55	< 1.50	< 1.45

*Corresponding author: Phone: +82632382460, Fax: +82632383822, E-mail: bearthink@korea.kr

§Acknowledgement: This study was conducted by support of NAS research and development project (Project no.: PJ00919804).

Introduction

농업에서 토양 물리성 질 (soil physical quality) 지표 설정은 생산성과 생산환경의 지속성을 동시에 고려한다. 건전한 토양은 공통적으로 양분과 수분을 충분히 공급하고, 물과 공기의 흐름이 원활하여 물이 잘 빠지고 충분한 공기를 공급할 수 있는 조건을 말한다. 하지만 각국의 토양특성, 관개, 기후조건 및 농기계 사용 등이 다양하기 때문에 지역 고유의 토양 물리성 질 지표 설정이 필요하다. Dexter (2004) 는 토양 수리적 특성이 미세구조를 반영하고 광범위한 토양에 적용이 가능한 토양물리성 질 지표가 될 수 있다고 보고하였다. 또한 지역특이성을 반영한 방법으로 토양구조 관련 인자들의 회귀분석을 통하여 물리성 적정범위를 재설정하고 토지 이용에 따른 적용 가능성을 평가하였다 (Renolds et al., 2008). 우리나라 는 토양의 물리적 특성과 개량 목표가 제시되었다 (Kim et al., 2013). 밭 토양에서 대형농기계 사용연수와 토양 물리성 상관관계를 분석하여 토양특성 반응을 평가하였고 (NAS, 2008), 용적밀도와 경도를 이용하여 완두, 대두 등의 작물뿌리 생육 제한 정도를 정량적으로 평가하였다 (Jo et al., 1977; Jung and Lim, 1989). 이와 같은 선행연구들로부터 특정 조건에서 물리성 적정 범위에 대한 단편적인 정보를 얻을 수 있었으나, 우리나라 밭 토양 물리성 적정 기준이 없어 이를 평가할 수 있는 지표개발이 필요하다. 우리나라 밭 토양의 대표적인 물리성 문제는 잦은 경운 및 대형 농기계 사용으로 인한 구조발달의 취약함이다. 따라서 본 연구에서는 토성별로 토양다짐 영향에 대한 토양 물리적 특성변화와 작물생육 반응을 비교하고, 이 결과를 바탕으로 공통지표를 구하고 이에 대한 범위를 설정하였다.

Materials and Methods

대상 토양 특성 국립농업과학원 구청사내 (126°59'08.8"E, 37°15'59.5"N) 연구포장의 사양토와 양토 및 미사질식양토 등 세 가지 토성을 대상으로 용적밀도-통기공극률 관계를 구명하는 실내실험과 토양다짐에 따른 작물생육 및 포화수리전도도, 용적밀도 등 토양물리적 특성을 비교하는 포장실험을 수행하였다. 시험 전 pH, EC, 유기물 함량 (Tyurin method), 유효인산, 양이온함량 및 입도분포 (hydrometer method) 등

을 분석하였다 (NAS, 2000) (Table 1).

시험포장 및 처리내용 한 토성 내에 대조구 (Control), 다짐처리구 (Compaction), 심경쇄토구 (Deep tillage)를 두었으며, 2012년에 심경쇄토와 다짐처리를 하였다. '다짐처리구 (compaction)' 는 경반층을 해소하고 다짐을 가하는 단계별로 처리가 가해졌다. 첫 단계로 표토를 30 cm 걷어낸 후 40 cm 깊이까지 크랭크쟁기 (Vangatrice SELVATICI series 120.45) 를 3회 반복 운행하여 경반층을 해소하였다. 두 번째 단계로 2.5 ton 중량의 롤러를 40번 반복 운행을 3회 실시하여 다짐처리를 하였다. 마지막으로 첫 번째 단계에서 걷어 놓았던 표토를 다시 덮어 토심 30 cm 깊이에 다짐층을 형성하였다. 다짐을 토양 표면 전체에 가하기 위해 농기계에 의한 다짐처리 모사 도구로 롤러를 사용하였다. '심경쇄토구 (Deep tillage)' 는 다짐처리구의 첫 단계 다음에 바로 걷어 놓았던 표토를 덮어 70 cm 깊이까지 푸슬푸슬한 상태를 만들었고, 처리를 가하지 않은 '대조구 (Control)' 를 두었다.

작물재배 및 생육조사 1차 년도에 들깨 (*Perilla frutescens* CV. 다유, 2012년 7월 2일 정식)와 옥수수 (*Zea mays* L CV. 미백 2호, 2012년 5월 29일 정식)를, 2차 년도에 들깨를 심었던 위치에 감자 (품종, 수미, *Solanum tuberosum* L., 2013년 4월 1일 파종)를, 옥수수를 심었던 위치에 호밀 (*Secale cereael*, 2012년 10월 2일 파종)을 재배하였다. 모든 처리구는 정식 전에 약 15 cm 이내로 로터리 경운을 하였고, 비료공급은 표준비료 사용량에 준하였다 (NAS, 2012). 다짐에 대한 작물의 생육 반응을 알아보기 위해 수확기에 간장 (stem length)과 총 건물중 (농업과학기술 연구조사분석기준, RDA, 2012)을 측정하였다. 뿌리조사 (유효근권심, 최장근)는 인접한 두 작물의 토양단면에서 이루어졌으며, 육안관측을 통해 작물뿌리의 약 70%가 분포하는 깊이를 '유효근권심', 가장 깊이 뻗은 뿌리를 '최장근'으로 정의하였다.

용적밀도와 통기공극률 분석 토양의 다져짐에 따른 통기공극 변화를 구명하기 위해 '용적밀도-통기공극률 간의 상관관계'를 분석하였다. 이를 위해 채취시기와 깊이를 달리 하여 2인치 코어 시료를 채취하였다. '통기공극률'은 공극률과 10 kPa에서의 토양수분함량 간의 차로 구하였는데, pressure

Table 1. The soil physicochemical properties of studied fields.

Soil Texture	pH	EC	OM	Avail. P ₂ O ₅	Exch. cation			Sand	Silt	Clay
					K	Ca	Mg			
	(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹			%		
SL	6.3	0.12	9	178	0.13	2.2	0.7	63.5	31.5	5.0
L	6.8	0.38	20	163	0.70	7.5	2.1	8.8	47.9	23.3
SiCL	6.0	0.22	14	61	0.22	5.6	1.9	7.7	63.1	29.2

chamber를 이용하여 10 kPa 에서의 토양수분함량을 측정하고 건조중량법으로 공극률과 용적밀도를 측정하였다. 생육에 제한이 되지 않는 최소한의 기상률은 10% 이며 (Drewry and Paton, 2005; Drewry et al., 2008), 용적밀도 기준 설정을 위해 이를 건조 생육에 대한 물리성 제한 조건으로 적용하였다.

용적밀도와 포화수리전도도 분석 토양다짐 및 심경쇄토처리에 따른 포화수리전도도를 평가하기 위해 작물 수확 후 1, 2년 차에 뿌리 관측 지점에서 3 inch 코어로 시료를 채취하였다. 이에 대해 용적밀도와 포화수리전도도 (정수위법, constant head method)를 측정하고, '용적밀도- 포화수리전도도 간의 상관관계'를 분석하였다. 포화수리전도도가 0.1 cm hr^{-1} 일 때 우리나라 투수성 등급 '매우느림' 으로 평가하는데 (NAS, 1992), 용적밀도 기준 설정을 위해 이를 건조 생육에 대한 물리성 제한 조건으로 적용하였다. 또한 처리 내 시험구에서의 연차 간 용적밀도를 비교하였다.

통계분석 처리간 생육비교를 하기 위하여 간장, 총 건물중 등에 대해서 분산분석을 한 후, 유의성이 인정된 경우 대조구 (Control)를 기준으로 LSD검정을 하였다 ($p < 0.05$). 용적밀도와 통기공극률 간에 상관분석을 하였고, 포화수리전도도를 로그값으로 전환한 후 용적밀도와 포화수리전도도 간에 회귀분석을 하였다. 통계분석 프로그램은 SAS 9.2 (USA)를 이용하였다.

Results

용적밀도와 통기공극률 관계 다양한 용적밀도를 갖는 토양에서 용적밀도-통기공극률 간의 관계를 분석한 결과, 용적밀도가 증가함에 따라 통기공극률이 감소하였으며, 사양토, 양토, 미사질식양토 모두 유의수준 0.001에서 고도로 유의한 로그함수 관계를 나타냈다 (Fig. 1). 감소폭은 식양토 > 양토 > 사양토 순으로 점토함량이 많은 토양에서 용적밀도가 증가함에 따라 통기공극률이 크게 감소하여 용적밀도 $1.0 \sim 1.4 \text{ Mg m}^{-3}$ 범위에서 통기공극률은 각각 사양토 18~36%, 양토 14~35%, 미사질식양토 13~40% 이었다. 한편 통기공극률이 10% 미만일 때, 용적밀도는 사양토 1.62 Mg m^{-3} , 양토 1.48 Mg m^{-3} , 미사질식양토 1.45 Mg m^{-3} 이었다.

용적밀도와 포화수리전도도 관계 수확 후 시험포장의 처리구별 용적밀도는 다짐처리구 > 대조구 > 심경쇄토구 순으로 나타났으며, 대조구와 다짐처리구는 2년 차에 용적밀도가 감소하였으며, 심경쇄토구는 다소 증가하였다 (Fig. 2). 심토 다짐 및 심경쇄토 등의 처리가 가해진 포장에서 심토 용적밀도와 포화수리전도 관계를 분석한 결과, 용적밀도가 증

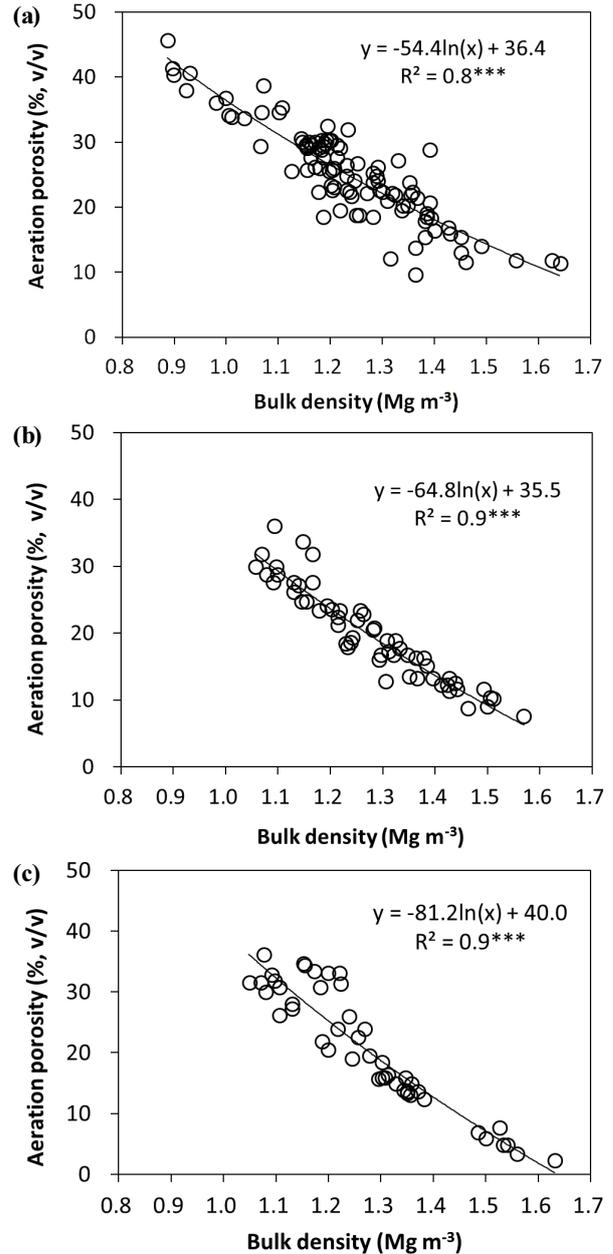


Fig. 1. The relationships of bulk density and aeration porosity: (a) Sandy loam (b) Loam (c) Silty clay loam.

가함에 따라 포화수리전도도가 감소하며, 포화수리전도도를 로그화하였을 때 이들은 유의한 선형 관계를 보였다 (Fig. 3). 용적밀도가 증가함에 따른 포화수리전도도의 감소 정도는 미사질식양토에서 가장 크고 사양토에서 가장 작게 나타나, 원활한 투수 상태를 갖는 용적밀도 범위가 미사질식양토에서 다소 좁았다. 우리나라 투수성 등급이 '매우느림' 에 해당하는 포화수리전도도 0.1 cm hr^{-1} 을 적용하였을 때, 이에 해당하는 용적밀도는 각각 사양토 1.72 Mg m^{-3} , 양토 1.68 Mg m^{-3} , 식양토 1.54 Mg m^{-3} 이었다.

다짐처리별 작물생육 비교 들깨와 감자 경장은 다짐처리구보다 대조구에서 컸으나, 옥수수과 호밀의 경우는 두

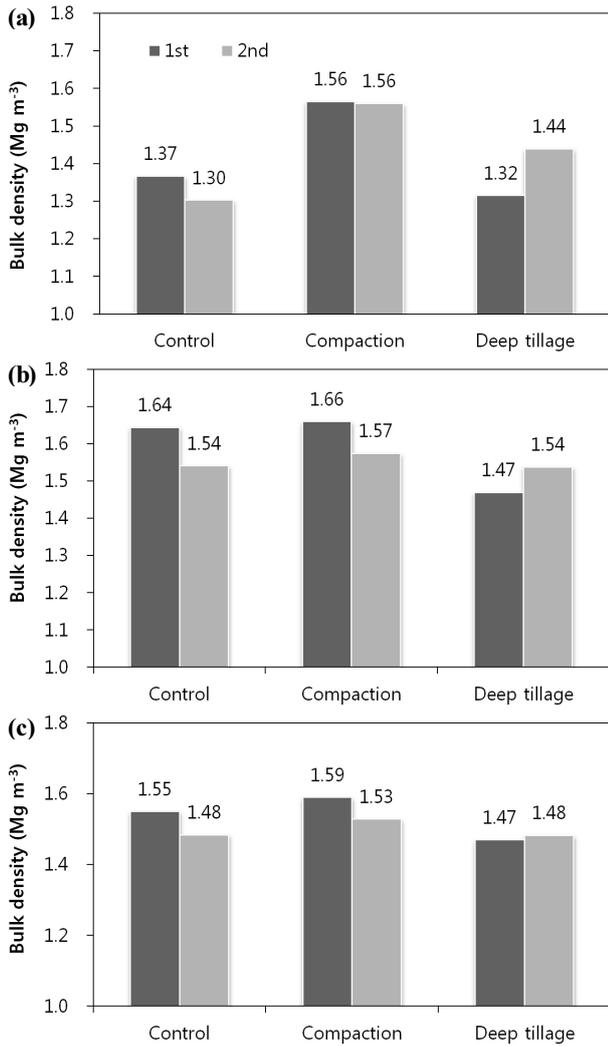


Fig. 2. The subsoil bulk density of studied fields at harvest season for 1st & 2nd yr. (a) Sandy loam (b) Loam (c) Silty clay loam.

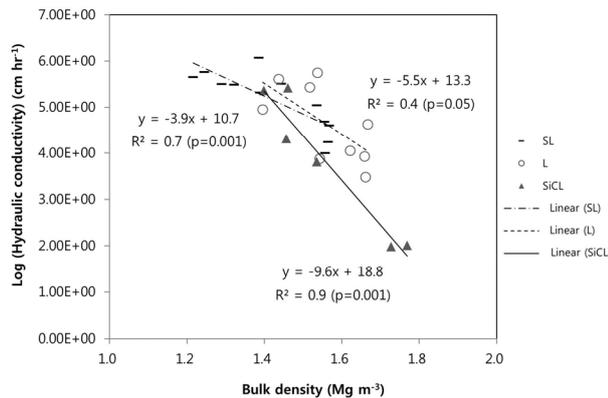


Fig. 3. The relationships of subsoil bulk density and hydraulic conductivity of studied fields.

처리구 간 대소관계가 토성별로 일관된 경향을 보이지 않았고, 심경쇄토 처리구에서 가장 크게 나타났다 ($p < 0.05$) (Table 2). 총 건조중과 유효근권 및 최장근은 심경쇄토구 > 대조구 > 다

짐처리구 순으로 나타났다. 다짐처리구에서의 생육은 대조구와 비교하였을 때 미사질식양토에서 경장이 43~89%로 가장 저조하였다. 작물별로는 들깨와 감자 생육이 불량하였으며, 특히 들깨에서 경장이 대조구의 43~70%로 컸고, 옥수수 와 호밀은 토성에 따라서 차이가 미약하거나 오히려 다짐처리구가 대조구보다 생육이 더 양호하게 나타났다. 한편, 심경쇄토구에서 생육은 대조구와 비교하였을 때 토성별로 양토에서 경장이 107~156%, 총 건조중이 112~234%로 가장 크게 나타났으며, 작물별로는 들깨와 감자 생육에서 더 크게 나타났으며, 특히 감자에서 102~156%로 가장 양호하였다. 따라서 토성별로 다짐으로 인한 생육 저조는 미사질식양토에서 크게 나타나고, 심경쇄토로 인한 개선은 양토에서 크게 나타났다. 생육 결과는 연차별로 같은 포장 위치에 배치된 작물 그룹별로 (재배 포장 A : 들깨, 감자; B : 옥수수, 호밀) 유사한 경향이였다. 다짐으로 인한 생육의 저조는 1년 차인 들깨에서 크게 나타났고, 심경에 의한 생육 향상은 2년 차인 감자에서 크게 나타났다.

토양물리성 및 작물생육을 고려한 토양물리성 지표

설정 통기공극률 10% 이상을 유지하기 위한 최소 용적밀도는 사양토 1.62 Mg m⁻³, 양토 1.48 Mg m⁻³, 미사질식양토 1.45 Mg m⁻³ 이었다 (Fig. 1). 다짐처리구 2년 차에 심토의 용적밀도는 사양토 1.56 Mg m⁻³, 양토 1.57 Mg m⁻³, 미사질식양토 1.53 Mg m⁻³ 이었다 (Fig. 2). 또 우리나라 투수등급 ‘매우느림’에 해당하는 포화수리전도도 0.1 cm hr⁻¹ 이상이 되기 위한 최소 용적밀도는 사양토 1.72 Mg m⁻³, 양토 1.68 Mg m⁻³, 미사질식양토 1.54 Mg m⁻³ 이었다 (Fig. 3). 이상의 결과에서 용적밀도를 통기성, 투수성, 수분공급 등 작물생육에 저해되지 않는 각 항목을 종합한 물리성 개량 기준에 대한 공통지표로 설정할 수 있었으며, 이 때의 범위는 토성별로 사양토 1.55 Mg m⁻³, 양토 1.50 Mg m⁻³, 미사질식양토 1.45 Mg m⁻³ 미만이었다 (Table 3).

Discussion

용적밀도가 용적밀도-통기공극률 함수와 토양수분상태, 통기성, 투수성을 동시에 고려할 수 있는 지표로 판단할 수 있었다. 또 작물에 원활한 수분공급 조건과 동시에 투수 및 통기가 제한되지 않는 조건에서 용적밀도 값을 토양 물리성 개량 기준으로 최종적으로 평가할 수 있었다. 완두와 대두 뿌리 생육에 대한 토양 물리성 관계에 대한 선행연구 (Jo et al., 1977; Jung and Lim, 1989)와 비교하였을 때, 투수성 및 통기성, 토양수분 공급 등 작물생육에 제한이 되는 조건과 물리적 조건을 동시에 고려하여 토양 물리성 평가 지표를 설정했다는 데 의의가 있다. 농경지의 주요한 토양 물리성 문제는 토양 내 불투수층, 통기불량, 심토 다짐, 뿌리뻗음 제한 등 한 가지

Table 2. The comparisons of crop growth. The perilla and corn are 1st year crops and the potato and rye are 2nd year crops. The perilla, potato and corn, rye are applied same field, respectively. Lowercase letter means significance difference (LSD, p<0.05).

(a) Sandy loam

Applied field	Applied Year	Crop	Treatment	Stem Length	Total Weight of Dry Biomass	Effective Root Depth	Max. Root Depth
				cm	kg/10a	cm	cm
A	1 st	Perilla	Control	151 b	767 a	15	30
			Compaction	104 c	427 b	11	16
			Deep tillage	175 a	696 a	27	60
	2 nd	Potato	Control	52 b	1,808		
			Compaction	46 c	1,727		
			Deep tillage	74 a	2,402		
B	1 st	Corn	Control	188	1,649 a	28	58.5
			Compaction	195	1,596 a	12	18.5
			Deep tillage	193	1,231 b	30	57
	2 nd	Rye	Control	164 b	1651	40	140
			Compaction	181 a	1322	16	62
			Deep tillage	183 a	1620	40	135

(b) Loam

Applied field	Applied Year	Crop	Treatment	Stem Length	Total Weight of Dry Biomass	Effective Root Depth	Max. Root Depth
				cm	kg/10a	cm	cm
A	1 st	Perilla	Control	107 b	418 ab	12	30
			Compaction	75 c	231 b	12	23
			Deep tillage	139 a	610 a	11	54
	2 nd	Potato	Control	48 b	1,403		
			Compaction	46 b	1,169		
			Deep tillage	75 a	3,282		
B	1 st	Corn	Control	148 c	1,725 a	14	58
			Compaction	158 b	1,008 b	9	38
			Deep tillage	169 a	1,940 a	14	62
	2 nd	Rye	Control	182 b	923	20	81
			Compaction	184 b	779	12	78
			Deep tillage	195 a	1202	18	85

(c) Silty clay loam

Applied field	Applied Year	Crop	Treatment	Stem Length	Total Weight of Dry Biomass	Effective Root Depth	Max. Root Depth
				cm	kg/10a	cm	cm
A	1 st	Perilla	Control	134 a	561 a	16	28
			Compaction	58 b	119 b	10	23
			Deep tillage	137 a	741 a	17	33
	2 nd	Potato	Control	56 a	1,777		
			Compaction	50 b	1,560		
			Deep tillage	57 a	2,431		
B	1 st	Corn	Control	194 b	2,061	15	47
			Compaction	210 a	1,976	10	30
			Deep tillage	212 a	2,034	>30	55
	2 nd	Rye	Control	182 ab	1928	25	108
			Compaction	188 a	1328	20	108
			Deep tillage	173 b	1855	29	110

Table 3. Threshold subsoil bulk density for optimal soil physical quality.

Soil physical Index	Sandy Loam	Loam	Silty Clay Loam
	----- Mg m ⁻³ -----		
Bulk density	< 1.55	< 1.50	< 1.45

혹은 몇 가지가 복합적으로 나타나기 때문에 한 가지 특성을 고려하여 토양 물리성을 평가하기는 어렵다 (Dexter and Czyz, 2000).

Canarache (1990)은 물리성 항목 10가지에 대한 가중평균치로 지표를 구하였고, Dexter (2004)는 다양한 범위의 토양 유기물 함량, 경운상태, 토성 등에 적용이 가능하고 작물생육을 고려할 수 있는 물리성 지표를 제안하였다. 뿐만 아니라 토양의 수리적 특성으로 확장이 가능하여 여러 특성의 토양에 적용할 수 있어 시스템적으로 정량적 평가가 가능한 지표라고 할 수 있다. 본 연구결과에서 물리성 지표는 수리적 특성의 연계가 없고 토성마다 다른 범위가 적용되는 것으로 토양물리성에 대한 제한적인 정보를 제공한다. 하지만, 주요한 물리성 정보를 포괄하며 측정방법이 용이하여 진단 지표로서 활용성이 높을 것으로 기대된다.

점토가 많은 미사질식양토에서 용적밀도가 증가함에 따라 통기공극률 감소폭과 포화수리전도도 감소폭이 컸다. 이는 점토함량이 많은 토양이 다져짐에 따라 공극이 줄어들고 수분 이동이 감소되는 정도가 커지기 때문인 것으로 생각해 볼 수 있었다. 포화수리전도도가 용적밀도 1.35 Mg m⁻³ 이하에서는 미사질식양토에서 가장 높아 배수가 매우 양호한 상태를 보이나, 1.59 Mg m⁻³ 이상이 되면 사양토에서 가장 배수가 잘되는 것으로 나타났다. 푸슬푸슬한 상태에서 미사질식양토의 배수성이 좋으나, 다짐이 되면 급격히 취약해진다는 것을 알 수 있었다. 따라서 토양관리시 무엇보다도 점토가 많은 토양의 경우에는 다짐이 되지 않도록 주의가 필요할 것으로 판단되었다.

총 건조중, 유효근권 깊이, 최장근 깊이는 심경쇄토구 > 대조구 > 다짐처리구 순으로 작물 생육이 나타났다. 일부 옥수수과 호밀 경장이 다짐처리구 > 대조구로 나타났으나, 총 건조중이나 유효근권, 최장근 깊이 등의 생육이 심경쇄토구 > 대조구 > 다짐처리구 순으로 나타나 생육결과를 종합해볼 때, 대조구보다 다짐처리구에서 생육이 불량하였다. 이는 토양이 다져졌을 때 근권환경이 악화하고 토양개량시 작물 생육이 양호해지기 때문이다 (Jo et al., 1977; Jung and Lim, 1989; Khan et al., 2012). 한편 대조구 대비 다짐처리구 생육을 비교하였을 때 미사질식양토에서 가장 불량하였으며, 대조구 대비 심경쇄토구 생육을 비교하였을 때 양토에서 가장 생육이 양호하였다. Khan et al. (2012)도 다짐처리시 점토함량이 많은 토양에서 밀 생육이 더 불량해졌다는 보고를 한 바 있다. 토양에 다짐이 가해졌을 때 점토함량이 적은 토양은 주로 수직방향으로 다져지나 점토함량이 많은 토양은 사방으

로 다져진다 (Ellies et al., 2000). 따라서 점토함량이 많은 토양은 물질의 수평, 수직이동이 모두 제한되고 작물 생육이 더 불량하게 나타나는 것으로 판단된다. 포화수리전도도 실험 결과와 공통적으로 점토함량이 많은 토양에 대해 다짐에 좀더 민감하게 관리해야 한다는 시사점을 얻을 수 있었다. 한편 구조가 잘 발달한 토양에서는 하중에 의한 다져짐이 깊게 형성되지 않는다 (Ellies et al., 2000)는 점을 감안할 때, 기본적으로 토양구조 발달이 될 수 있도록 관리하여야 하겠다.

다짐이 가해지고 1년 후 작물에 영향이 두드러지게 나타났고, 2년 후에는 좀 완화되는 경향을 보였으며, 심경쇄토 후 1년 보다 2년 뒤에 그 효과가 더 크게 나타났다. 대형농기계 사용은 깊이의 토양층에 압력을 가하고 횡수를 거듭할수록 이전보다 더 깊숙한 층에 경반층을 형성한다 (Shierlaw and Alston, 1984). 토양은 한 번 다져지면 다시 회복되기 어렵기 때문에 관리자는 연속적인 농기계 운영을 피하고 주기적 운행계획 하에 운용하여 다져짐이 심화되는 것을 방지하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 토성별로 밭 토양의 물리성 개량 기준 설정 방법과 그 값을 제시하였다. 향후에는 과수원 토양 및 아직 관리기준이 세워지지 않은 시설재배지 토양에 대해 토양특성, 작물특성 및 관개방법 등 다양한 조건을 고려한 물리성 기준에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Conclusions

용적밀도가 증가함에 따라 통기공극률과 포화수리전도도가 감소하였고, 이는 미사질식양토에서 현격하게 나타났다. 다짐으로 인한 생육 저조는 미사질식양토에서 크게 나타나고, 심경쇄토로 인한 개선은 양토에서 크게 나타났다. 따라서 미사질식양토에서는 다짐이 일어나지 않도록 하는 것이 가장 중요한 관리방법이며, 다져짐이 많이 일어나는 수분조건에서 농기계 작업을 피하는 것이 선행되어야겠다.

토양 물리성 항목 간의 상관관계 및 토양다짐 처리별 생육비교를 통해 통기성, 투수성, 토양수분함량 등에 생육 제한조건을 종합적으로 고려하여 작물 생육에 적합한 밭 토양 물리성 개량 기준을 용적밀도 지표로 요약할 수 있었으며, 범위는 토성별로 사양토 1.55 Mg m⁻³, 양토 1.50 Mg m⁻³, 미사질식양토 1.45 Mg m⁻³ 미만으로 결론지을 수 있었다.

References

- Canarache, A. 1990. *Fizica Solurilor Agricole*. Ceres Publ., Bucurest, France.
- Dexter, A.R. and E.A. Czyz. 2000. Soil physical quality and the effects of management practices. p. 153-165. In Wilson, M.J. and Maliszewska-Kordybach, B. (ed.). *Soil Quality, Sustainable Agriculture and Environmental Security in Central and Eastern Europe*. NATO Science Series 2, Environmental Security, vol. 69. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, Netherlands.
- Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*. 120:201-214.
- Drewry, J.J., K.C. Cameron, and G.D. Buchan. 2008. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing—a review. *Aust. J. Soil Res.* 46:237-256.
- Drewry, J.J. and R.J. Pato. 2005. Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. *Aust. J. Soil Res.* 43:525-531.
- Ellies, S.A., R.R. Smith, B.J. Cuevas, F.J. Dorner, and T.A. Proschle. 2000. Effect of moisture and transit frequency on stress distribution on different soils. *Agro Sur.* 28(2):60-68.
- 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, Y.S. and H.S. Lim. 1989. Influence of soil texture and bulk density on foot growth characteristics and nutrient influx rate of soybean plant. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 22(3):221-227.
- Khan, S.R., M.K. Abbasi, and A.U. Hussan. 2012. Effect of induced soil compaction on changes in soil properties and wheat productivity under sandy loam and sandy clay loam soils: a greenhouse experiment. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 43:2550-2563.
- Kim, L.Y., H.J. Cho, S.D. Hong, and H.S. Lee. 2013. Amelioration guideline of soil physical properties in paddy rice fields based on soil survey of dominant soil series in Korea. *J. Agr. Sci. Chungbuk Nat'l Univ.* 29(2):49-54.
- NAS (National Institute of Agricultural Science). 1992. Introduction to Korean soil. Soil survey document No.13. NAS, RDA. Wanju, Korea.
- NAS (National Institute of Agricultural Science). 2008. Study on soil physical properties of soil compaction. Agricultural Environment research Report. NAS, RDA. Wanju, Korea.
- NAS (National Institute of Agricultural Science). 2000. Methods of soil and plant analysis. NAS, RDA. Wanju, Korea.
- NAS (National Institute of Agricultural Science). 2012. Standards for crop fertilizer supplement. NAS, RDA. Wanju, Korea.
- RDA (Rural Development Administration). 2012. Standards for agriculture science and technology of survey and analysis. RDA. Wanju, Korea.
- Reynolds, W.D., C.F. Drury, X.M. Yang, and C.S. Tan. 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*. 146:466-474.
- Shierlaw, J. and A.M. Alston. 1984. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant Soil.* 77:15-28.