

Assessment of Subsoil Compaction by Soil Texture on Field Scale

Hee-Rae Cho*, Kang-Ho Jung, Yong-Seon Zhang, and Kyung-Hwa Han

Soil and Fertilizer management division, National institute of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Korea

(Received: October 13 2015, Revised: November 12 2015, Accepted: November 12 2015)

It is necessary to assess soil physical properties and crop growth treated by compaction to establish the soil management standard. This study evaluated the bulk density, strength and crop growth after subsoil compaction for sandy loam and loam on the field in Suwon, Korea. The treatments were compaction and deep tillage. Sandy loam and loam were classified to coarse soil and fine soil, respectively, depending on clay contents. In coarse soil, bulk density of compacted plot was 8~17% greater than control and deep tilled plot. The root growth was worse in compacted plot compared with control. In fine soil, plow pan was not observed in deep tilled plot with 5~19% smaller bulk density than compacted plot and control. Deep tillage improved the crop growth. The soil physical properties by compaction were dependent on clay content and crop growth limit depended on the traffic driving.

Key words: Subsoil compaction, Soil bulk density, Penetration resistance, Crop growth, Soil porosity

The crop growth of corn and perilla affected by soil compaction.

Crop	Soil texture	Treatment	Length of Stem	Weight of	Effective	Max.
			(cm)	Dry Biomass	Root depth	Root depth
Corn	Sandy Loam	DT	193 ab	1,231 b	30	57
		Cp	195 a	1,596 a	12	18.5
		Control	188 b	1,649 a	28	58.5
	Loam	DT	169 a	1,940 a	14	62
		Cp	158 b	1,105 b	9	38
		Control	148 c	1,725 a	14	58
Perilla	Sandy Loam	DT	175 a	696 ab	27	60
		Cp	104 c	427 c	11	16
		Control	151 b	767 b	15	30
	Loam	DT	139 a	610 a	11	54
		Cp	73 c	231 c	12	23
		Control	106 b	418 b	12	30

*LSD, $\alpha=0.05$

DT=deep tillage, Cp=compaction

*Corresponding author: Phone: +82632382434, Fax: +82632383822, E-mail: chohr519@korea.kr

§Acknowledgement: This study was conducted by support of NAS research and development project (Project no. : PJ010120).

Introduction

토양다짐은 토양퇴화 (soil degradation)의 주요원인으로 농기계 사용 및 잦은 경운 등 인위적인 요인에 의해 심화된다 (European soil framework directive, 2006; German soil protection law, 1998). 다짐으로 토양 강도가 증가하여 작물의 뿌리뻗음이 제한되고, 토양 내 공기순환, 양분, 수분의 이동 및 저장 능력이 불량해져 결과적으로 토양의 비옥도가 저하되기 때문이다. NASS (2008)은 우리나라 대표 밭 토양 64 지점에 대해서 대형농기계 사용연수와 토양 물리성의 상관관계를 분석한 결과, 대형농기계 사용연수의 증가에 따라 토양 물리성이 악화된다고 보고하였으며, Schaffer et al. (2007)는 콤바인 10번 주행 후 대공극률과 공극연결성이 감소되었다고 보고하였다. 농작업의 기계화는 우리 농업환경 여건에서 필연적이기 때문에 다짐에 영향을 주는 요인을 분석하고 취약한 조건에 대응하는 것이 필요하다. 다짐에 영향을 주는 주요 요인으로 토양수분함량, 토성, 농기계 작업 등을 공통적으로 지적하고 있으며, 이에 대한 해결책으로 유기물 투입, 심경, 식물의 뿌리의 신장 등 경종적, 물리적, 생물적 방법 등이 제안되고 있다. NASS (2008)은 조사한 다짐된 밭토양에 대해 아만나까 경도 24 mm 이상의 다짐된 지점에 대해 심토파쇄와 거친 유기물 혼입을 추천하였다. 심경으로 완두생산이 64% 증가되었으며 (Henderson, 1991), 석회를 함께 투입했을 때, 밀과 콩의 생산량이 증수되었다 (Hamza and Anderson, 2003)는 보고가 있었다. 한편 토양 강도가 증가되었을 때 뿌리신장에 제한을 받지만, 동시에 작물 뿌리의 종류에 따라서 뿌리가 다짐된 토양의 구조를 깨뜨리고 결과적으로 다짐을 해소하기도 한다. 작물 종류에 따라 이런 특성은 상당히 다르며 (Singh and Sainju, 1998), 뿌리형태에 따라 다져진 토양에 뻗는 힘이 달라지고 (Kirkegaard et al., 1992), 특히 콩류 (legumes)가 더 효과적으로 보고되고 있다 (Cochrane and Aylmore, 1994). 지금까지 세부요인에 따라 토양특성 변화 및 작물반응 간의 관계가 어떻게 되는지 많은 연구수행으로 이들 간의 상관성에 대한 많은 정보를 얻을 수 있었다. 그러나 기상 및 지역별 환경에 따른 변이가 큰 토양다짐에 대한 합리적인 관리기준 및 대안을 마련하기 위해서는 포장단위에서 같은 환경 및 작물조건에서 토성 등의 토양특성별로 다짐에 대한 효과를 비교 분석하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 다짐에 대한 합리적인 관리기준을 마련하고자 포장조건 (field scale)

에서 다짐처리 시 토성에 따라 토양 물리성 변화와 작물생육 반응을 비교 평가하였다.

Materials and Methods

시험포장 및 처리구 본 시험은 국립농업과학원 구 청사내 ($126^{\circ}59'08.8''E$, $37^{\circ}15'59.5''N$) 사양토와 양토 시험연구 포장에서 2012년에 수행하였다. 시험 전 토양의 양분 차이에 따른 작물생육의 영향을 없애고자 pH, EC, 유기물 함량 (Tyurin method), 유효인산, 양이온함량 등을 분석하여 체크하였고, 토성분석 (hydrometer method)을 하였다 (NAAS, 2000) (Table 1). 시비는 표준시비량 (NAAS, 2012)을 따랐다. 처리구는 한 토성 내에 각각 심경쇄토구 (DT, Deep Tillage), 다짐처리구 (Cp, Compacted), 대조구 (Control)를 두었다. ‘심경쇄토구 (DT, Deep Tillage)’는 표토 30 cm를 걷어내고 40 cm 깊이로 크랭크쟁기 (Vangatrice SELVATICI series 120.45)를 3회 반복 운행한 후 먼저 걷어 놓았던 표토를 덮어서 70 cm 깊이까지 푸슬푸슬한 상태를 만들었다. ‘다짐처리구 (Cp, Compacted)’는 다짐처리를 보다 효과적으로 보기 위하여 이전에 형성되어 있던 심토의 경반층을 해소한 후, 다짐처리를 하였다. 심경쇄토구와 같이 깊이갈이를 한 후, 2.5 ton 중량의 롤러를 40번 반복 운행을 3회 실시하여 땅에 다짐처리를 하고 걷어 놓았던 표토를 다시 덮어서 만들었다. 다짐처리를 전면에 가하기 위해 접촉면에 굴곡이 없는 롤러를 이용하여 농기계 다짐처리를 모사하였다. ‘대조구 (Control)’는 처리를 가하지 않은 이전 상태 그대로를 이용하였으며, 전체적으로 작물 정식 전에 15 cm 이하 깊이로 로터리 경운을 하였다. 시험 전 시험연구포장은 매년 작물을 재배되고 작물재배시 로터리 경운 등의 농기계 작업이 이루어졌다.

작물재배 및 생육조사 10 cm 미만 깊이로 로터리 경운 후, 옥수수 (*Zea mays L.*, 2012년 5월 29일 정식)와 들깨 (*Perilla frutescens var. japonica*, HARA, 2012년 7월 2일 정식) 어린 묽을 옮겨 심었고, 정식간격은 각각 60×30 cm 이었다. 다짐에 반응하는 정도가 뿌리 생육 특성에 따라 어떠한지 비교하기 위해 심근성인 옥수수와 천근성인 들깨를 작물로 선정하였다.

다짐에 대한 작물의 생육 반응을 알아보기 위해 수확기에 지상부와 지하부를 조사하였으며, 간장 (stem length), 총 건물중, 유효근권심, 최장근 등이었다. 서로 인접한 작물

Table 1. Soil chemical properties.

Soil texture	pH	EC	OM	Av.P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	Sand	Silt	Clay
	(1:5)	(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	-----	(cmol _c kg ⁻¹)	-----	-----	(%)	-----
Sandy loam	6.3	0.12	9	178	0.13	2.2	0.7	63.5	31.5	5.0
Loam	6.8	0.38	20	164	0.70	7.5	2.1	28.8	47.9	23.3

의 토양단면을 조사하여 작물뿌리의 약 70%가 분포하는 깊이를 ‘유효근권심’으로 보았고, 가장 깊이 뻗은 뿌리를 ‘최대뿌리신장깊이’로 보았으며, 이를 육안으로 조사하였다. 그 밖의 작물의 생육조사는 농업과학기술 연구조사분석기준(RDA, 2012)에 준하여 실시하였다.

토양 물리성 조사 작물근권의 물리성 변화를 관찰하기 위해 수확 후, 관입저항(Penetrologger, Eijkelkamp, Holland)을 3번복 측정하였고, 약 20~30 cm 깊이에서 용적밀도 측정(core method)을 위해 시료를 채취하였다. 인위적인 다짐의 영향을 피하기 위해 작물과 작물 사이 부분과 이랑 사면의 중간위치의 교차지점에서 시료채취 및 조사를 실시하였다.

통계분석 처리간 생육비교를 하기 위하여 간장, 총 건물중 등에 대해서 대조구(Control)를 기준으로 유의수준 0.05에서 LSD분산분석을 하였다 (SAS 9.2, USA).

Results and Discussion

토양 물리성 변화 사양토에서 옥수수 수확 후 용적밀도 ($Mg\ m^{-3}$)를 조사한 결과 대조구, $1.29 <$ 심경쇄토구, $1.39 <$ 다짐처리구, 1.56 순으로 나타났고 (Fig. 1), 관입저항은 다짐처리구 13~20 cm 깊이에서 경반층(plow pan)이 나타났다 (Fig. 2). 들깨 재배구에서 용적밀도 ($Mg\ m^{-3}$)는

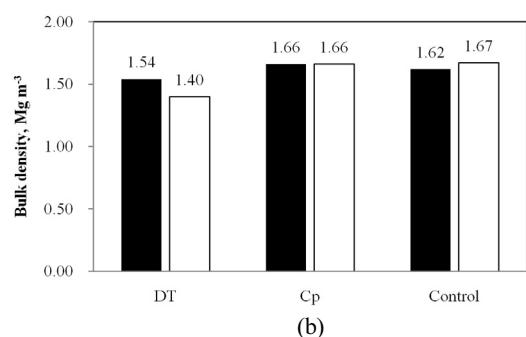
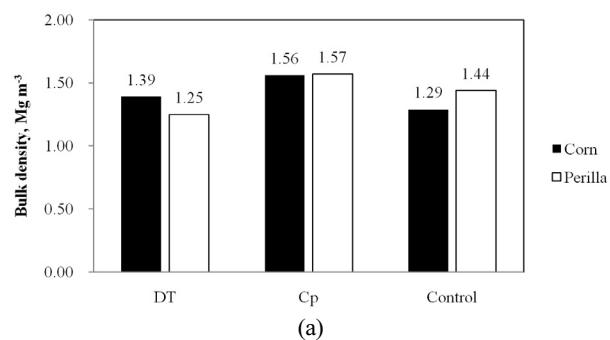


Fig. 1. The bulk density after harvest of corn and perilla. (a) sandy loam, (b) loam.

DT=deep tillage, Cp=compaction

심경쇄토구, $1.25 <$ 대조구, $1.44 <$ 다짐처리구, 1.57 순으로 나타났고 (Fig. 1), 관입저항은 옥수수에서와 비슷하였다 (Fig. 3). 옥수수와 들깨 다짐처리 시 대조구보다 8~17% 높은 용적밀도가 형성되고 경반층이 생성이 되었으며, 들깨의 심경쇄토구에서는 용적밀도가 15% 낮았으나 옥수수에서는 심경의 효과가 나타나지 않았다. 옥수수의 경우 예상과 달리 사양토에서 대조구보다 심경쇄토구에서 용적밀도가 다소 높게 나타났는데, 관입저항 측정치가 심경쇄토구에서 대조구보다 경도가 더 약하게 측정된 결과로 미루어 볼 때 포장에서의 심경에 대한 균일한 처리가 미흡했던 것으로 판단되었다.

양토에서 옥수수 수확 후 용적밀도 ($Mg\ m^{-3}$)는 심경쇄토구, $1.54 <$ 대조구, $1.62 <$ 다짐처리구, 1.66 순으로 나타났고 (Fig. 1), 관입저항은 대조구 12~20 cm, 다짐처리구 10 cm 깊이에서 경반층(plow pan)이 나타났다 (Fig. 2). 들깨 재배구에서 용적밀도 ($Mg\ m^{-3}$)는 심경쇄토구, $1.40 <$ 다짐처리구, $1.66 <$ 대조구, 1.67 순으로 나타났고 (Fig. 1), 관입저항은 다짐처리구 20~24 cm 깊이에서 나타났다 (Fig. 3). 양토에서는 사양토와 달리 대조구에서의 용적밀도가 다짐처리구와 비슷하게 높게 나타나 기계적 다짐을 가하지 않더라도 시간의 흐름에 따라 다져진 것으로 판단되었다. 심경쇄토 시에는 용적밀도가 5~19% 낮았지만 균질에 형성되는 경반층이 해소되는 등 토양 물리성 개선 효과가 뚜렷하게 나타났다.

토양관리의 편의를 위해 점토함량이 18% 이상인 토양을 ‘세립질(fine textured soil)’, 18% 미만일 때를 ‘조립질(coarse textured soil)’로 분류할 때, 위 결과로부터 세립질 토양은 다짐에 매우 민감하다는 것을 알 수 있었으며, 물리성 개선 시 토양수분 상태를 고려해야겠다. 한편 사양토와 양토의 다짐처리구는 2009년 전국 밭토양에 대한 심토(20~30 cm 깊이) 용적밀도 평균치(조립질 균 $1.56\ Mg\ m^{-3}$, 세립질 균 $1.66\ Mg\ m^{-3}$)와 상태와 비슷한 수준이었으며 Cho et al., (2012) 이 결과와 연관지어 볼 때 일반농경지 밭토양이 상당한 다짐상태임을 생각할 수 있겠다.

작물생육 반응 옥수수는 다짐처리 시 지상부 생육은 대조구와 비교하여 유의수준 0.05에서 유의한 차이가 뚜렷하지 않았으나 균질 발달이 불량하였으며, 심경쇄토 시 지상부 생육은 사양토에서는 유의성이 인정되지 않았으나 대체로 양호한 경향을 보였고 양토에서는 유의한 차이를 보였으며 균질 발달은 대조구와 비슷한 수준이었다 (Table 2). 유효근권(cm)은 다짐처리구, $9\sim12 >$ 대조구, $14\sim28 >$ 심경쇄토구 $14\sim30$, 최대뿌리신장깊이(cm)는 다짐처리구, $19\sim38 >$ 대조구, $58\sim59 >$ 심경쇄토구 $57\sim62$ 이었으며, 사양토에서 균권이 다소 깊게 형성되었다.

들깨는 다짐처리와 심경쇄토 시 지상부 생육을 대조구와

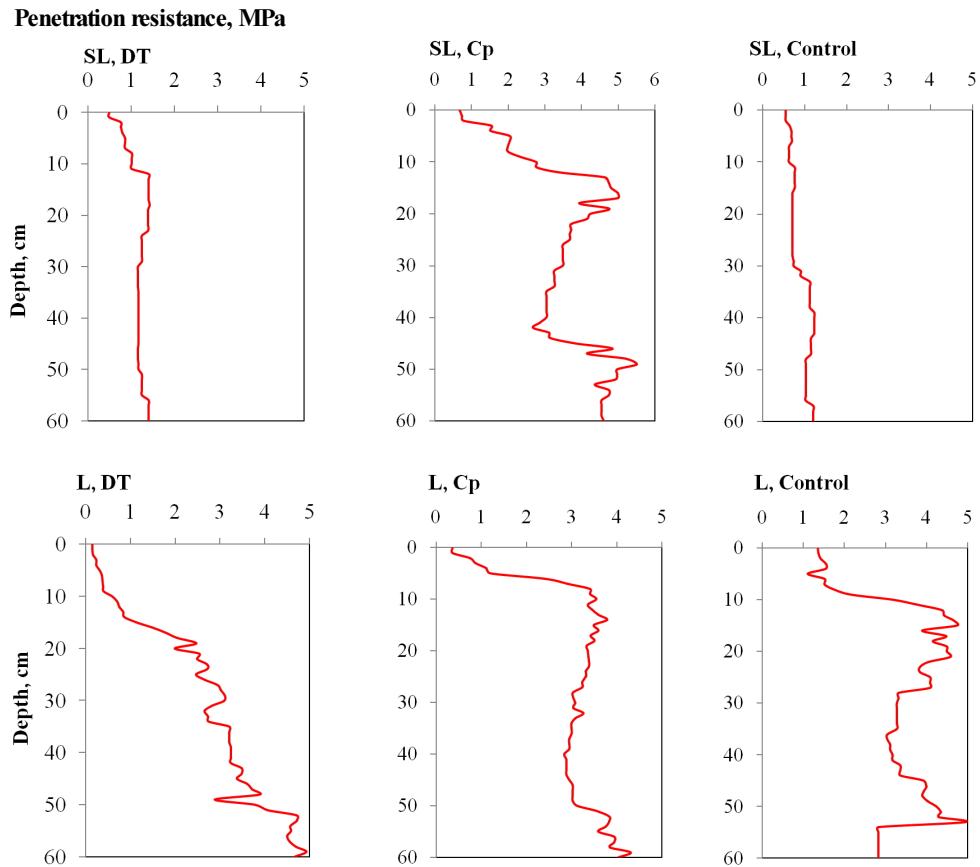


Fig. 2. The penetration resistance after harvest of corn according to soil texture and compaction.

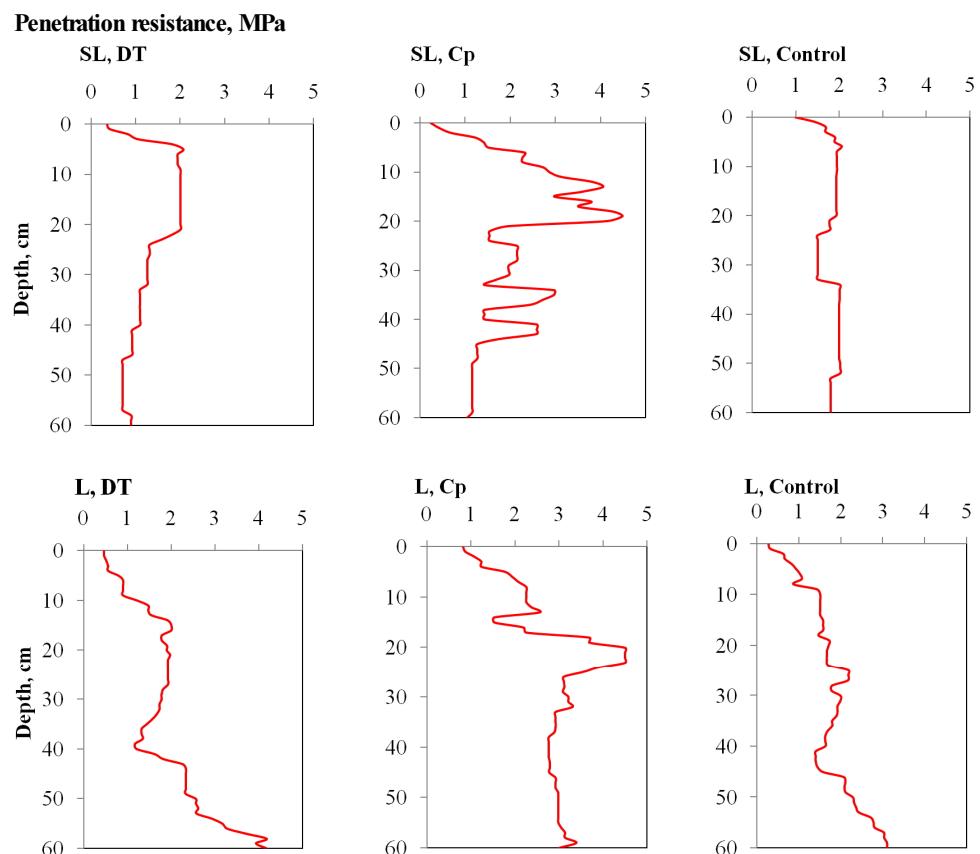


Fig. 3. The penetration Resistance after harvest of perilla according to soil texture and compaction.

Table 2. The crop growth affected by soil compaction (corn).

Soil texture	Treatment	Length of Stem	Weight of Dry Biomass	Effective Root depth	Max. Root depth
		(cm)	(kg/10a)	(cm)	(cm)
Sandy Loam	DT	193 ab	1,231 b	30	57
	Cp	195 a	1,596 a	12	18.5
	Control	188 b	1,649 a	28	58.5
Loam	DT	169 a	1,940 a	14	62
	Cp	158 b	1,105 b	9	38
	Control	148 c	1,725 a	14	58

*LSD, $\alpha=0.05$

DT=deep tillage, Cp=compaction

Table 3. The crop growth affected by soil compaction (perilla).

Soil texture	Treatment	Length of Stem	Weight of Dry Biomass	Effective Root depth	Max. Root depth
		(cm)	(kg/10a)	(cm)	(cm)
Sandy Loam	DT	175 a	696 ab	27	60
	Cp	104 c	427 c	11	16
	Control	151 b	767 b	15	30
Loam	DT	139 a	610 a	11	54
	Cp	73 c	231 c	12	23
	Control	106 b	418 b	12	30

각각 비교할 때 유의수준 0.05에서 유의하게 차이가 있었는데, 다짐처리구의 간장은 대조구에 비해 사양토, 양토는 31%, 총 건물중은 대조구에 비해 사양토, 양토는 44% 작았다 (Table 3). 균권 발달에서도 다짐의 영향과 심경쇄토의 효과가 뚜렷하게 나타나, 유효근권은 다짐처리구, 11~12 > 대조구, 12~15 > 심경쇄토구 11~27, 최대뿌리신장깊이는 다짐처리구, 16~23 > 대조구, 30 > 심경쇄토구 54~60 이었으며, 사양토에서 균권이 다소 깊게 형성되었다.

옥수수와 들깨의 균권 신장을 비교하였을 때, 대조구에서는 예상대로 심근성인 옥수수의 균권이 천근성인 들깨보다 깊게 나타났으며, 다짐처리에서는 두 작물 공통적으로 균권 생육이 불량하였으며, 들깨가 옥수수보다 더 얕게 뻗었다. 그러나 심경쇄토 처리에서는 옥수수가 들깨보다 약간 크거나 비슷하였다. 이 결과로부터 심경쇄토 효과가 들깨에서 큰 것으로 알 수 있었다. 또한 들깨는 옥수수에 비해 지상부 생육이 처리에 따라 분명하게 나타났으며, 특히 심경쇄토 처리시 대조구와 비교할 때 양토 (31%)에서 사양토 (15%)보다 더 효과적으로 나타나 세립질 토양에서의 심경쇄토 효과가 큰 것을 알 수 있었다.

토양다짐과 토양 물리성 및 작물생육 간의 관계 토양 다짐 및 심경 처리에 대한 토양 물리성은 토성에 따라 특성이 나뉘었고, 작물생육은 작물종류에 따라 특성이 다르게

나타났다. 다짐처리 시 균권 발달이 제한되었고, 심경쇄토는 물리성을 완화하고 균권이 깊어지는데 효과가 있었다. 토양 처리에 대한 토양 물리성과 작물생육 간의 관련성을 연결시켜보면 토성에 따라 토양 물리성과 작물생육 상호관계가 달랐다. 다짐처리 시 사양토에서는 토양 물리성이 불량할 때 작물생육 또한 저조하게 나타나 이들 간의 관계가 일관됨을 보였다. 한편 양토에서는 시간의 흐름에 따라 다져지는 특성으로 대조구와 다짐처리구 간에 토양 물리성 값의 차이가 거의 나타나지 않을 때도 있었는데, 작물생육은 심경쇄토 > 대조구 > 다짐 순으로 양호하게 나타나 작물생육은 처리와 직접적인 관련이 있는 것을 알 수 있었다. 작물생육측면에서 토양다짐에 대한 원인은 단순한 용적수준에서의 다짐이 아닌 기계적 다짐으로 토양구조에서의 변형으로 생각되며 정확한 분석을 위해 이들 간의 상호관계에 대해 추후 심층연구가 필요하겠다.

Conclusion

1. 조립질 토양 (coarse textured soil)은 다짐처리 시 용적밀도가 8~17% 높고 경반층이 형성되는 등 토양 물리성이 불량하고 심경쇄토시 토양물리성이 향상되었다. 작물생육은 다짐처리시 균권발달이 제한되었으며, 심경쇄토시 작물생육은 대조구와 비슷한 양상을 보여 물리성 개

선에 효과가 있는 것으로 나타났다.

세립질 토양 (fine textured soil)은 다짐처리구와 대조구 모두 토양 물리성이 불량하여 다짐에 민감한 특성을 보였으며, 심경쇄토 시 토양 물리성이 개선됨을 보였다. 하지만 작물생육 결과는 물리성 결과와는 달리 다짐처리구에서만 작물생육이 불량하였고, 심경쇄토 시 양호한 결과를 보여 개선효과가 뚜렷함을 알 수 있었다.

2. 다짐처리 시 옥수수와 들깨의 균권 생육불량이 공통적으로 나타났으며, 심경쇄토 처리에 대한 효과는 옥수수보다 들깨에서 뚜렷하여 심근성인 옥수수의 최대뿌리신장 깊이와 유사하였고 세립질 토양에서 효과가 더 크게 나타났다.

References

- Cho H.R., Y.S. Zhang, K.H. Han, H.J. Cho, J.H. Ryu, K.Y. Jung, K.R. Cho, A.S. Ro, S.J. Lim, S.C. Choi, J.I. Lee, W.K. Lee, B.K. Ahn, B.H. Kim, C.Y. Kim, J.H. Park, and S.H. Hyun. 2012. Soil physical properties of arable land by land use across the country. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(3):344-352.
- Cochrane, H.R. and L.A.G. Aylmore. 1994. The effects of plant roots on soil structure. In: Proceedings of 3rd Triennial conference 'Soils 94'. p.207-212.
- European Soil Framework Directive. 2006. Proposal for a directive of the European parliament and of the council establishing a framework for the protection of soil and amending directive 2004/35/EC, p.30.
- German soil protection law. 1998. *Gesetz zum Schutz des Bodens vom 17.03.1998. BGBI.I, p.502.*
- Hamza, M.A. and W.K. Anderson. 2003. Responses of soil properties and grain yields to deep ripping and gypsum application in a compacted loamy sand soil contrasted with a sandy clay loam soil in Western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 54:273-282.
- Henderson, C.W.L. 1991. Sensitivity of eight cereal and legume species to the compaction status of deep, sandy soils. *Aust. J. Exp. Agric.* 31:347-355.
- Kirkegaard, J.A., R.J. Troedson, H.B. So and B.L. Kushwaha. 1992. The effect of compaction on the growth of pigeonpea on clay soils. II. Mechanisms of crop response and season effects on an oxisol in a humid coastal environment. *Soil Tillage Res.* 24:129-147.
- NAAS. 2000. Methods of soil and plant analysis. National Academy of Agricultural Science, RDA, Jeonju, Korea.
- NAAS. 2008. Study on soil physical properties of soil compaction. Agricultural Environment research Report. RDA, Jeonju, Korea.
- NAAS, 2012. Standards for crop fertilizer supplement. National Academy of Agricultural Science, RDA, Jeonju, Korea.
- RDA. 2012. Standards for agriculture science and technology of survey and analysis. RDA, Jeonju, Korea.
- 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.
- Singh, B.P. and U.M. Sainju. 1998. Soil physical and morphological properties and root growth. *Hort. Sci.* 33: 966-971.