

토양 경반층 강도가 콩 뿌리신장 및 생육에 미치는 영향

정기열* · 윤을수 · 박창영 · 황재복 · 최영대 · 전승호 · 이황아

농촌진흥청 국립식량과학원 기능성작물부

Effect of Soil Compaction Levels and Textures on Soybean (*Glycine max* L.) Root Elongation and Yield

Ki-Yuol Jung*, Eul-Yoo Yun, Chang-Young Park, Jae-Bok Hwang, Young-Dae Choi,
Seung-Ho Jeon, and Hwang-A Lee

Functional Cereal Crop Research Division, NICS, RDA, Milyang, 627-830, Republic of Korea

Soil compaction is one of the major problems facing modern agriculture. Overuse of machinery, intensive cropping, short crop rotations, intensive grazing and inappropriate soil management leads to compaction. This study was carried out evaluate of the effects soil texture and different compaction levels within the soil profile on the soybean root growth and productivity. The soybean plants were grown in 21 cm ϕ \times 30 cm cylinder pots using three different soil textures (clay, fine loamy and coarse loamy) compacted at different compaction levels (1.25, 1.50, 1.75, and 2.00 MPa). Results revealed that soybean development is more sensitive on penetration resistance, irrespective of soil type. Soybean yield and root weight density significantly decreases with increasing levels of soil compaction in both clayey and fine loamy soils, but not in coarse loamy soil. The highest root weight density was recorded in coarse loamy soils, followed by fine loamy and clay soils, in descending order. The root growth by soil compaction levels started to decline from 1.16, 1.28 and 1.60 MPa for clay, fine loamy and coarse loamy soils. Soybean production in the field experiment decreased about 30% at compacted sub-soils compared to undisturbed soils.

Key words: Soil compaction, Soybean, Penetration resistance, Texture

서 언

최근 다양한 작부체계와 토지이용도 증가, 농기계의 대형화로 인해 토양 경반층의 강도와 두께가 증가되고 있는 실정이다. Jo et al. (1997)에 의하면 토양의 경도는 토성과 용적밀도, 수분함량에 따라 항상 변화되며, 작물 뿌리의 생육은 작물에 따라 약간의 차이는 있으나 일반적으로 15~20 kg cm⁻³ (2.0 MPa) 이상이 되면 뿌리신장이 장애가 일어난다고 하였다. 주로 논토양 경반층은 연속적인 동일깊이 경운과 농기계 하중에 의한 인위적인 작용에 의해 생성된다고 보고 되고 있다 (Hans and Randal, 1996). Kim et al. (2006)에 의하면 우리나라 논 토양의 야마나께 경도기준으로 평균 토양경도는 표토 11.3 mm (0.6 MPa) 심토 20.8 mm (1.2 MPa)이고, 경반층의 출현깊이는 17~29 cm, 경반층 평균두께가 12cm 정도이며 전체 44.1% 정도가 심토의 물리성

을 개량해야 할 대상이라고 보고했다. 또한 Yun et al. (2010)은 남부 다모작지 논토양 경반층의 최대저항값 출현 깊이는 약 27.1 cm, 원추관입 최대저항값은 2.50 Mpa 이었고 투수력은 0.03~0.14 mL hr⁻¹ 매우 낮아 양·수분의 수직 이동에 영향을 미친다고 보고하였다. Hamza and Anderson (2005)에 의하면 토양 경반층 생성은 토양에서 용적밀도 증가와 공극률 감소, 수분이동 및 통기성을 저해하고 결국 작물 뿌리신장을 저해하여 수확량 감소의 원인이 된다고 하였다. 일반적으로 토양 경반층에 의한 수량감소는 약 25% 정도이며, 심한 경반층이 생성된 토양에서는 40% 까지 생산량이 감소된다고 알려져 있다. Hamza and Anderson (2003)은 경반화된 토양에서 심토파쇄기로 약 40 cm 길이에 심경하였을 때 최대저항값이 약 1.2 MPa 정도 줄어들며 수량은 비 파쇄 처리에 비해 약 30% 증수되고 토양 물리성이 개선되어 콩 뿌리신장이 깊어진다고 하였다. 다른 작물에 비해 소비작물인 콩의 생육은 타 작물보다 토양 물리성에 영향을 크게 받으며 토양 경반층의 형성되면 토양용적밀도를 증가되고 공극률이 감소되어 토양 수분이동 및 콩 뿌리신장을 저해되며 작물생산성을 저하시키는 요인이 된다고 알려져

접수 : 2012. 3. 22 수리 : 2012. 6. 15

*연락처 : Phone: +82553501263

E-mail: jungky@rda.go.kr

있다 (Beutler and Centurion, 2008).

따라서 본 연구는 주요토성별 토양 경반층의 강도에 따른 콩 뿌리신장 및 생육반응을 비교 분석하고 토성별 콩 뿌리신장 한계값을 설정하여 최적 토양관리기술 및 생산성 향상에 기여하고자 수행하였다.

재료 및 방법

콩 뿌리의 신장 한계값 설정 주요 토양 경반층의 토양경도 변화에 따른 콩 생육 및 뿌리신장 특성을 평가하기 위해 미농무성 토성 분류법에 따라 미사질식양토 (Silty clay loam), 미사질양토 (Silt loam), 양토 (Loam) 등 3가지 토성을 대상으로 2006년부터 3년간 비가림 온실조건에서 완전임의배치법 (Completely Randomized Design, CRD) 5 반복 포트시험을 수행하였다. 시험 토양은 식질계 화동토, 식양질계 지산토, 사양질계 강서토 등 각 토성별 논토양에서 표토와 심토를 각각 분리하여 채취하여 풍건 후 곱게 분쇄하여 국제 표준망체 (ISO mesh size) 2 mm로 통과시킨 토양을 시험에 이용하였고, 시험에 이용된 토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같았다.

각 토성별 토양은 Fig. 1과 같은 유압식 토양경도조절 압력계로 폭 21.5 cm, 높이 30 cm의 철재 무저원통 포트의 15~25 cm 깊이에 토양경도를 각각 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 MPa 단위로 충진 후 표토를 15 cm 복토하였다. 시험작물은 중만생종인 태광콩 (Taekwang)을 공시하였고, 시비량은 성분분량 기준으로 질소, 인산, 칼리를 각각 30, 30 및 34 kg ha⁻¹을 전량기비로 주었으며, pot 당 5립씩 파종하고 입모 후 3주를 남기고 솎음하였다. 콩 뿌리의 조사는 완숙기 (R8 stage)에 콩 수확 후 포트 깊이 5 cm 단위로 토양을 절단하여 약 15분간 물속에 침전한 후 물로 세척한 후 풍건하여 뿌리밀도를 조사하였으며, 포트를 수직으로 절단한 후 뿌리의

출현 깊이를 조사하였다.

토양 경반층 포장시험 논 콩 재배지 토양 경도별 콩 생육 및 생산성 평가를 위해 국립식량과학원 기능성작물부내 위치한 시험포장 (N 35° 49' 24", E 128° 74' 25")에서 수행하였으며 시험토양은 평택토 (fine silty, mixed, mesic family of Typic Endoaquepts)으로 시험 전 토양의 특성은 Table 2와 같았다.

시험포장은 굴삭기로 표토를 걷어 낸 다음 토양 경반층을 심토파쇄하고 전동롤러를 이용하여 15~25 cm 깊이에 토양경도를 각각 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 MPa로 경반층을 조성하였다. 경반층 조성 후 걷어낸 표토를 15 cm로 다시 복토를 하였다. 토양의 이화학적성은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 pH는 초자전극법, 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 유효규산은 1N-NaOAc (pH 4.0)침출법, 치환성양이온은 1M NH₄OAc (pH 7.0)로 침출하여 Inductively Coupled Plasma (Liberty 110, German)로 측정하였다. 또한 토양의 투수력은 내경 30 cm, 외경 55 cm, 높이 25 cm인 무저 금속원판으로 된 Double

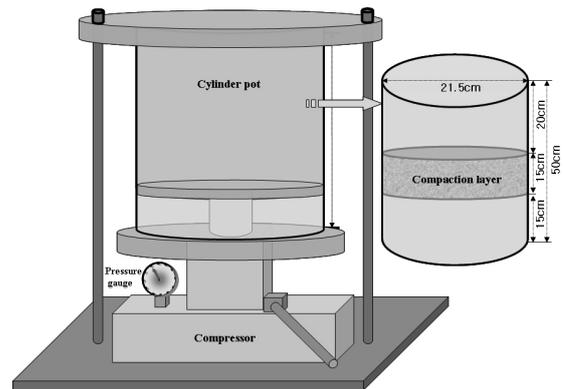


Fig. 1. Soil compaction equipment.

Table 1. Physico-chemical properties of soil before experiment.

Texture class	Particle Size			pH	O.M	Avail. P ₂ O ₅
	Clay	Silt	Sand			
	----- % -----			1:5	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
Silty clay loam	35.6	53.7	10.7	6.3	16	77
Silt loam	24.4	58.1	17.5	5.6	26	81
Loam	11.9	44.9	43.2	5.9	14	149

Table 2. Physico-chemical properties of soil before field experiment.

pH	EC	T-N	O.M.	Avail. P ₂ O ₅	Exch. cation			Particle size			Texture class
					K	Ca	Mg	Sand	Silt	Clay	
1:5	dS m ⁻¹	%	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	---- cmol _c kg ⁻¹ ----			----- % -----			
6.82	0.25	0.20	21.9	102.7	0.46	7.08	1.79	31.7	51.1	17.2	Silt loam

ring method (Black, 1965)로 측정하였고, 단위면적, 단위 시간에 토양에 침투하는 물의 양을 측정하여 Darcy's 법칙 (1856)에 따라 계산하였다.

콩 뿌리 및 생육조사 공시작물은 중만생종인 태광콩 (Taekwang)을 공시하였으며, 재식거리는 60 cm × 15 cm로 하였고 주당본수는 2본으로 하였다. 또한 시비량은 성분량으로 질소 인산 칼리를 각각 30, 30 및 34 kg ha⁻¹로 하여 전량기비로 주었으며 재배법은 농촌진흥청 콩의 표준재배법에 준하여 재배하였다. 콩 뿌리중량밀도 (Root weight density) 조사는 콩 수확 후 직경 × 길이 (30 cm × 30 cm) 크기의 실린더 코어를 토양에 박은 후에 깊이 5 cm 단위로 토양을 절단하여 약 15분간 물속에 침전한 후 물로 뿌리를 세척한 후 풍건하여 뿌리중량 밀도를 분석하였다. 콩의 생육 및 수량조사는 농촌진흥청 농사시험연구조사기준 (1995)에 의해 완숙기 (R8 stage)에 경장, 경직경, 백립중, 주당협수, 수량 등을 조사하였다.

결과 및 고찰

콩 뿌리신장 특성 토양 경반층 형성은 작물의 수량 및 생육에 밀접한 관계가 있으며, 원추관입저항, 공극률, 용적 밀도와 같은 토양의 물리적 특성은 작물의 뿌리생육과 생산성 평가에 이용되고 있다 (Silva et al., 2004). 특히 원추관입저항값은 토양 경반층의 정도와 작물뿌리 생육을 평가하는 기준으로 이용되고 있다 (Letey, 1985). Gupta (1987) 와 Silva et al. (1994)에 의하면 콩 뿌리의 신장을 제한할 수

있는 토양 물리성의 한계 기준은 공극률 10%, 식양토에서 용적밀도 1.55 g m⁻³, 원추관입저항은 2.0 MPa으로 보고되고 있다. Scrivner et al. (1985)은 선형 모델식에 의해 콩 뿌리신장을 제한하는 한계 용적밀도 기준은 1.88 g cm⁻³이라고 보고하였다. 또한 Hallmark & Barber (1984)등은 1.45 g cm⁻³의 용적밀도가 콩의 뿌리 성장을 감소시킨다는 것을 보고하였다. 또한 Jo et al. (1977)은 동일한 수분조건하에서 완두뿌리의 신장은 콩뿌리신장은 경도가 증가 할수록 감소되고 두인자간에 고도의 유의한 상관성이 있다고 보고하였다. 따라서 본 연구는 토양 경반층의 강도가 콩의 뿌리신장에 미치는 영향을 구멍코자 미사질 식양토 (Silty clay loam), 미사질양토 (Silt loam), 양토 (Loam) 등 3가지 토성을 대상으로 인위적으로 토양경도를 조절하여 포트시험을 수행한 결과 토양경도에 따른 토양 깊이별 뿌리분포밀도 변화는 Fig. 2와 같았다. 토성에 따른 경반층 정도 변화에 따른 콩 뿌리의 신장 깊이는 세립질인 미사질식양토에 비해 조립질 토양 일수록 깊게 신장하였으며 토양 강도가 약 할수록 깊게 신장하는 특성을 보였다. 미사질식양토의 경우 1.00 MPa에서 35 cm까지 신장하는 반면 2.00 MPa에서는 25 cm로 경반층의 강도가 높아질수록 낮아지는 경향을 보였다. 반면 양토의 경우 1.00 MPa에서 40 cm, 2.00 MPa는 45 cm로 미사질식양토에 비해 깊게 신장하는 특성을 보였다. 토양경도에 따른 토양 깊이별 뿌리의 분포밀도는 토양경도가 높을수록 낮아지는 경향을 보였으며 미사질식양토 > 미사질양토 > 양토 순으로 큰 경향을 보였다. 미사질식양토의 경우 1.00 MPa에서 57%인 반면, 2.00 MPa로 토양경도 값이 높아지며 따라 각각 60%로 대부분의 뿌리가 표토에 분포하였다. 반면 경반층 이하에서는 1.00 MPa에서 5.9%이었으

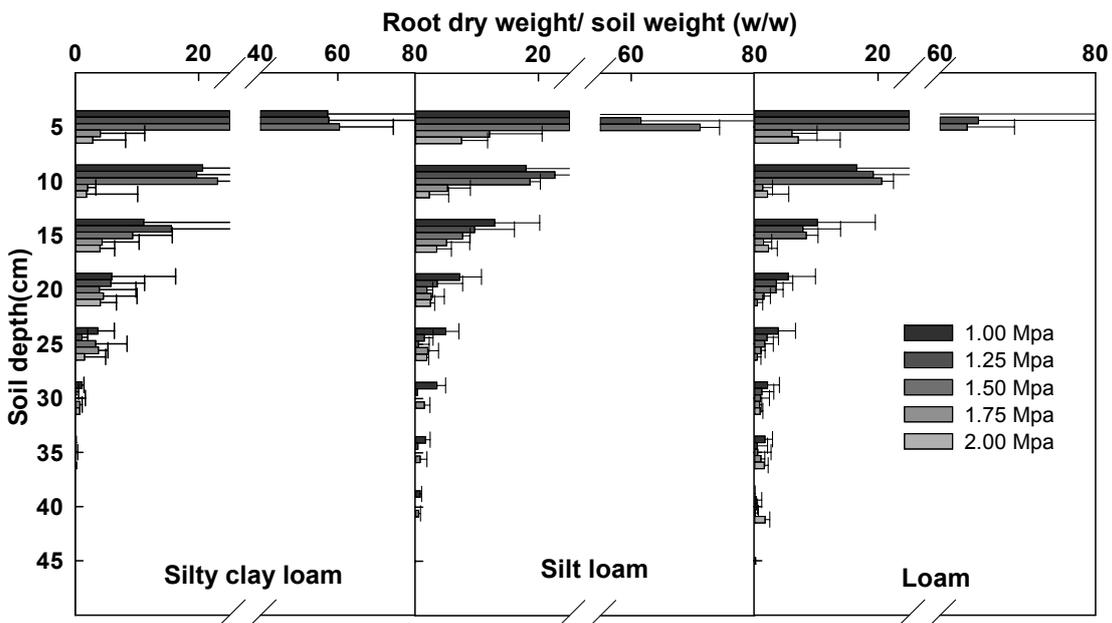


Fig. 2. Root weight density as a function of soil texture and soil compaction levels.

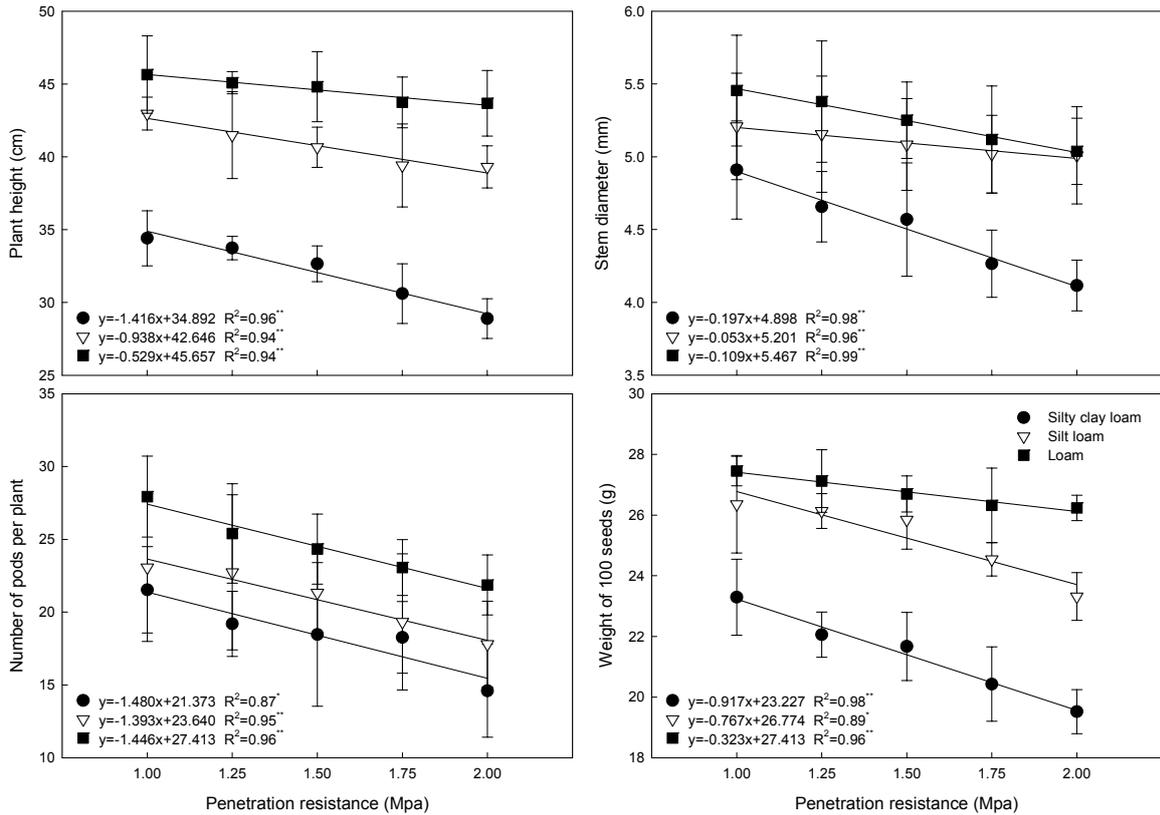


Fig. 3. Regression between penetration and parameter of soybean development as soil compaction levels in three soil textures. 5% (*) or 1% (**) significance level.

나 2.00 MPa에서는 3.9%로 크게 낮아지는 경향을 보였다.

이러한 결과는 경반화된 토양에서는 콩 뿌리가 심근하지 못하고 주로 표토에 주로 분포하거나 포아리처럼 얽혀 신장하며 콩 생육 및 수량구성요소에 영향을 미쳐 생산량 저하의 직접적인 요인인 것으로 판단되었다. 이러한 결과는 용적밀도 1.45 Mg m^{-3} 일 때 콩 뿌리의 분포밀도가 약 10% 감소하며 1.69 Mg m^{-3} 일 때 약 50% 감소한다고 보고한 Rosolem et al. (1998)와 유사한 결과를 보였다. 따라서 토성별 토양 경도에 대한 콩 뿌리신장 최소제한 저항값은 토양 깊이별 뿌리의 분포밀도를 기준으로 미사질식양토 1.14 MPa, 미사질양토는 1.3 MPa, 양토 1.6 MPa로 나타났다.

콩 생육 특성 주요 토성별 토양경도를 달리하여 시험을 수행한 결과 토양 경도 변화와 생육특성과의 관계는 Fig. 3와 같았다. 콩의 생육은 토양경도가 증가 할수록 경장, 경직경, 주당협수, 100립 중 등 생육 구성요소가 감소되는 것으로 나타났으며 토양경도와 밀접한 부의 선형관계를 보였다. 주요 토성별 토양경도 변화에 따른 생육은 미사질식양토 > 미사질양토 > 양토 순으로 경향을 크게 받는 것으로 나타났고, 미사질양토 및 양토에 비해 미사질식양토의 경우 토양경도가 증가함에 따라 주요 생육 특성이 크게 감소되는 결과를 보였다. 특히 주요 생육특성 중 토양경도가 증가함에

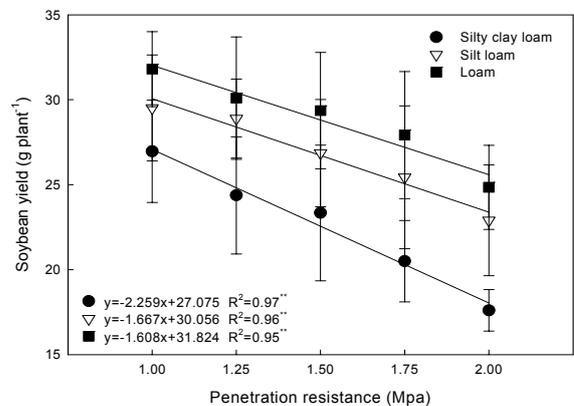


Fig. 4. Regression between penetration and parameter of soybean yield as soil compaction levels in three soil textures. 5% (*) or 1% (**) significance level.

따라 경장, 경직경, 100립중이 크게 감소되었으며 두 인자간에 고도의 유의한 상관성이 있었다. 콩의 생육은 토양의 경도변화에 영향을 받으며, 토성에 따라 차이를 보인다는 보고 (Letey, 1985)와 유사한 결과를 보였다. 토양 경도경도 변화와 콩 수량과의 관계는 Fig. 4와 같았다. 콩 수량은 경장, 경직경, 100립중과 같은 생육반응과 유사한 반응을 보였으며 토양경도와 밀접한 부의 선형관계를 보였다.

주요 토성별 토양경도 변화에 따른 콩 수량의 감소는 미

사질식양토 > 미사질양토 > 양토 순으로 높은 경향을 보였으며, 미사질양토 및 양토에 비해 미사질식양토에서 크게 감소되는 결과를 보였다. 이는 경반화된 토양에서 콩 생산성의 감소는 뿌리의 세포분열을 저해하여 양수분의 흡수능 저하와 직접적인 관계가 있는 것으로 판단되며, 콩 수량은 뿌리 생장과 밀접한 관계있다고 보고 (Benghough and Mullins, 1990)와 유사한 결과를 보였다. 따라서 콩의 수량을 기준으로 토성별 뿌리신장 토양경도에 대한 최소제한 저항값은 Fig. 4에서와 같이 미사질식양토 1.14 MPa, 미사질양토는 1.3 MPa, 양토 1.6 MPa으로 나타났다.

논 콩 재배지 토양 경반층 개선 효과 대부분의 작물은 뿌리를 통해 수분과 함께 양분을 흡수하고 토양중 이들 성분의 가용도는 뿌리의 분포에 의하여 좌우된다. 특히 Batey (1990)에 의하면 뿌리의 신장은 토양 경반층과 밀접한 관계가 있고 콩의 수량성을 높이기 위해서는 화학적 성질을 개량하기에 앞서 물리적 특성을 개량하는 것이 중요하다고 하였다. 최근 토지이용의 다양화와 대형농기계의 이용으로 토양경반화가 증가하고 실정이며, 또한 콩은 생태적으로 심근성이고 잔뿌리가 많으며 근권 영역이 큰 작물로 알려져 있고 토양 근권 환경조건에 따라 수량성이 크게 좌우될 수 있기 때문에 토양 경반층 개량에 의한 콩 증수 효과를

높일 수 있다. 따라서 본시험은 토양 경반층이 형성된 논토양 (평택토)을 대상으로 인위적으로 토양경도를 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 MPa의 경반층을 조성한 후 콩 뿌리신장 및 콩 수량의 변화를 시험하였다.

토양경도에 따른 토양 깊이별 뿌리분포밀도 변화를 보면 Fig. 5에서와 같이 표토에서는 1.00 MPa의 경우 57%인 반면, 2.00 MPa로 토양경도 값이 높아지면 뿌리분포비율이 78%로 대부분의 뿌리가 표토에 분포하는 특성을 보였으며, 20 cm이하 심토에서는 1.00 MPa에서 5.0%로 2.00 MPa 0.9%비해 높은 경향을 보였다. 토양경도별 콩 뿌리의 출현 깊이는 1.00 MPa에서 22 cm까지 신장하는 반면 2.00 MPa 처리구에서는 14 cm로 경반층의 강도가 높아질수록 뿌리의 출현깊이는 낮아지는 경향을 보였다.

토양 경반층 강도별 콩 생육상황 보면 Table 3에서와 같이 토양경도 높아질수록 경장, 경직경, 주장협수는 낮아지는 경향을 보였으며, 콩 수량은 2.00 MPa 처리구가 2,236 kg ha⁻¹인 반면 1.00 MPa 처리구에서 3,056 kg ha⁻¹으로 약 25% 증수되는 것으로 나타났다. 이는 Ishaq et al., (2001) 이 사양질 토양을 대상으로 토양 경반화에 의한 작물수량은 약 38% 감소된다는 보고와 유사한 결과를 나타내었다.

토양 투수력은 토양 경반층의 상태를 측정 할 수 있는 기준이 되고 있으며, Hamza and Anderson (2003)에 의하면

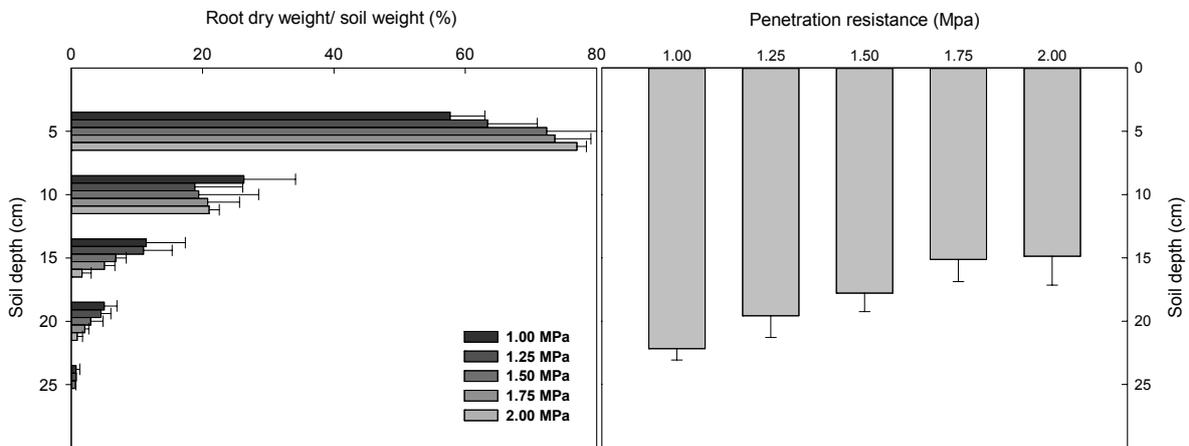


Fig. 5. Rooting depth and weight density as affected compaction levels.

Table 3. Mean value of yield components as soil compaction levels in the field experiment.

Compaction levels	Plant height	Stem diameter	Number of pods per plant	Yield
MPa	cm	mm		kg ha ⁻¹
1.00	64.76	8.25	50.67	3,056±38.1
1.25	57.00	8.52	50.32	2,998±91.9
1.50	48.63	8.22	46.55	2,742±33.8
1.75	45.73	7.82	43.57	2,522±25.6
2.00	42.58	7.40	37.48	2,236±92.0

Table 4. Soil physical characteristic as affected by soil compaction levels.

Compaction levels MPa	Bulk density g m ⁻³	Three phases			Porosity
		Solid	Liquid	Gaseous	
1.00	1.21	45.53	36.06	18.41	54.47
1.25	1.37	51.63	29.97	18.39	48.37
1.50	1.44	54.32	29.64	16.04	45.68
1.75	1.51	56.81	27.32	15.87	43.19
2.00	1.57	59.42	23.01	17.58	40.58

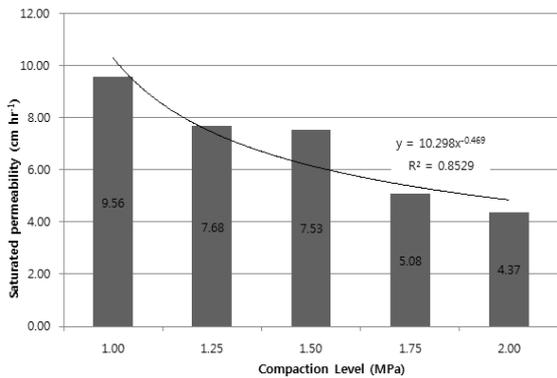


Fig. 6. Infiltration of root zone as affected by soil compaction levels.

표토 경반층의 경도가 높아지면 토양수분의 수직 이동을 저해하고 수분퍼텐셜 낮아져 작물에 수분 공급을 저해하여 작물의 한발피해를 초래할 수 있고 강우시에 습해를 일으킬 수 있으며, 토양 투수력은 입단화된 토양에서 보다 토양 경반화에 의해서 크게 저해된다고 보고하였다. 토양의 경반층의 강도별 투수력 변화는 Fig. 6과 같이 1.0 MPa : 9.56 cm, 1.25 MPa : 7.68 cm, 1.5 MPa : 7.53cm, 1.75 MPa : 5.08 cm, 2.0 MPa : 4.37 cm로 토양경도가 증가 할수록 투수력은 낮아지는 경향을 보였으며, 토양경도가 1.5 MPa 이상에서 투수력이 급격하게 낮아지는 경향을 보였다. 또한 경반화된 토양층위의 물리성 차이는 Table 4와 같았다. 토양경도가 높아질수록 용적밀도, 고상은 증가하고, 공극률, 함수율, 액상과 기상 등은 반대로 낮아지는 경향을 보였다.

요 약

본 연구는 논토양 경반층의 강도가 콩의 뿌리신장에 미치는 영향을 구명코자 미사질식양토 (Silty clay loam), 미사질양토 (Silt loam), 양토 (Loam) 등 3가지 토성을 대상으로 경반층 강도에 따른 콩 뿌리 및 작물 생육반응을 분석하여 논 콩 재배지 논토양의 생산성 향상을 위한 합리적인 토양경반층 관리 방법을 제시코자 수행한 결과 다음과 같은

결론을 얻었다.

토양 경도경도 변화에 따른 콩의 생육은 토양경도가 증가 할수록 경장, 경직경, 주당협수, 100립중, 콩 수량은 감소되는 것으로 나타났으며 토양경도 변화와 밀접한 부의 선형관계를 보였다. 토성에 따른 토양 경반층 강도별 콩 뿌리의 신장 깊이는 세립질인 미사질식양토에 비해 조립질 토양일수록 깊게 신장하였으며 미사질식양토의 경우 1.00 MPa에서 35 cm 까지 신장하는 반면 2.00 MPa에서는 25 cm로 경반층의 강도가 높아질수록 낮아지는 경향을 보였다. 토양 깊이별 뿌리분포는 미사질식양토의 경우 1.00 MPa에서 57%인 반면, 2.00 MPa로 토양경도 값이 높아지며 따라 각각 60%로 대부분의 뿌리가 표토에 분포하였다. 토양 경반층이 형성된 논토양 (평택동)을 대상으로 인위적으로 토양 경도를 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 MPa의 경반층로 조성한 후 콩의 생육반응을 조사한 결과 토양경도 높아질수록 경장, 경직경, 주장협수는 낮아지는 경향을 보였으며, 콩 수량은 2.00 MPa 처리구가 2,236 kg ha⁻¹인 반면 1.00 MPa 처리구에서 3,056 kg ha⁻¹으로 약 25% 증수되는 것으로 나타났다. 토양의 경반층의 투수력은 1.0 MPa에서 9.56 cm인 반면 1.5 MPa 이상에서 급격하게 감소되는 경향을 보였으며, 토양경도가 높아질수록 용적밀도, 고상은 증가하고, 공극률, 함수율, 액상, 기상 등은 반대로 낮아지는 경향을 보였다.

따라서 논 콩 재배지 토양의 토성별 토양경도에 대한 콩 뿌리신장 최소제한 저항값은 토양 깊이별 뿌리의 분포밀도를 기준으로 미사질식양토 1.14 MPa, 미사질양토는 1.3 MPa, 양토 1.6 MPa로 나타났다.

인 용 문 헌

Batey, T. 1990. Control of compaction on the farm. A personal view. Soil Technol. 3:225-229.
 Benthough, A.G. and C.E. Mullins. 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. J. Soil Sci. 41:341-358.

- Beutler, A.N. and J.F. Centurion. 2004. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*. 61(6):626-631.
- Beutler, A.N. and J.F. Centurion. 2008. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. *Pesq. agropec. bras., Brasilia*. 43(11):1591-1600.
- Black, C.A. 1965. *Methods of soil analysis, Part I*. Am. Soc. Agron, Medison, USA.
- Darcy, H. 1856. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, Dalmont, Paris.
- Gupta, S.C. and R.R. Allmaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6:65-100.
- Hallmark, W.B. and S.A. Barber. 1984. Root growth and morphology, nutrient uptake, and nutrient status of early growth of soybeans as affected by soil P and K. *Agron. J.* 76:209-212.
- 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(3):273-282.
- Hamza, M.A. and W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82(2):121-145.
- Hans, K. and R. K. Taylor. 1996. *Soil compaction problems and solutions*. cooperative extension service (AF-115) Kansas State University. <http://www.ksre.ksu.edu/library/CRPSL2/AF115.pdf>
- Ishaq, M., A. Hassan, M. Saeed, M. Ibrahim, and R. Lal. 2001. Subsoil compaction effects on crops in Punjab Pakistan. I. Soil physical properties and crop yield. *Soil Tillage Res.* 59:57-65.
- 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.
- Jo, I.S., B.K. Hyun, H.j. Cho, Y.S. Jang, and J.S. Shin. 1997. Effect of soil texture and bulk density on the least-limiting water range. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(1):51-55.
- Kim, L.Y., H.J. Cho, S.O. Chung, W.Y. Park, and K.S. Lee. 2006. Determination of tillage depth based on physical properties of soil for rice production in Korea. *Key Engineering Materials*. 321-323:1229-1232.
- Letej, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1:277-294.
- NIAST. 2000. *Methods of soil chemical analysis*. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Rosolem, C.A. and M. Takahashi. 1998. Soil compaction and soybean root growth. In: Box, J.E. (Ed.), *Root Demographics and their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems*. Proceedings of the 5th Symposium of the International Society of Root Research, Clemson, South Carolina, USA, pp. 295-304.
- Scrivner, C.L., B.L. Conkling, and P.G. Koenig. 1985. *Soil productivity indices and soil properties for farm-field sites in Missouri*. Extension Publication. University of Missouri-Columbia, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station, Columbia, Missouri.
- Silva, A.P. S. Imhoff, and B. Kay. 2004. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*. 61:451-456.
- Silva, A.P., B.D. Kay, and E. Perfect. 1994. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1775-1781.
- Yun, E.S., K.Y. Jung, K.D. Park, Y.K. Sonn, C.Y. Park, J.B. Hwang, and M.H. Nam. 2011. Compaction characteristics of multi-cropping paddy soils in south-eastern part of Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5):688-695.