

원추형 탐침봉을 이용한 밭작물 유효근권심 현장 진단

한경화 · 장용선* · 정강호 · 조희래

농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료과

In-situ estimation of effective rooting depth for upland crops using hand penetration of cone probe

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

Soil and Fertilizer, National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju, 565-851, Korea

Received on 17 March 2015, revised on 26 June 2015, accepted on 10 July 2015

Abstract : Plant root penetration through soil profile is restricted by compacted layer such as plow pan under conventional tillage. For detecting the compact layer, we made a graduated T-shape probe and measured compared between the depths with rapid change in feeling hardness of hand penetration using T-shape probe and with a rapid increase of penetrometer cone index. On upland crops, including red pepper, corn, soybean and cucumber, plow pan depth ranged from 10 cm to 25 cm depth. The effective rooting depth (ER) had significant correlation with the plow pan depth (PP) except soils with the shallow ground water and/or poorly drained soil. The regression equation was $ER = 0.9 \cdot PP$ ($R^2 = 0.54^{**}$, $N = 14$) with the applicative PP range of 10-25 cm.

Key words : Effective rooting depth, Cone probe, upland crops, *In-situ* estimation

I. 서론

작물근권은 관수 및 시비 등 영농관리의 대상일 뿐 아니라 높은 생물-물리-화학적 활성으로 물, 양분, 탄소의 저장 및 순환의 중심에 있으므로 진단을 통해 효율적 영농과 건전한 토양환경관리를 유도한 필요가 있다. 작물뿌리가 작용하는 깊이는 유효근권심으로 표현되는데 이는 뿌리가 수분을 흡수하는 권역으로 정의되며 토양단면에서 뿌리가 70-80% 분포하는 깊이로 측정하고 있다(Kim et al., 2007; Smit, 2000). 이러한 토양단면을 통한 유효근권심의 진단은 토양의 교란과 함께 시간과 노력이 많이 드는 단점이 있다. 최근 뿌리의 분포를 토양특성인자로 간접적으로 측정하고자 하는 연구가 이루어지고 있으며 그 예로 용적밀도 및 관입식 경도가 있다. 이는 둘 다 토양 치밀도를 알려주는 척도로 뿌리신장이 저해되는 높은 치밀도 부위를 측정하여 유효근권심을 추정하는 방법이다(B cel et al.,

2012; Thompson et al., 1987). 특히 밭작물 재배지의 경우 집약된 영농으로 경운이 잦게 이루어져 치밀성이 토양 표면에 비해 급격히 높아지는 쟁기바닥층이 나타나는 곳이 많으며 그 깊이는 갈이깊이, 토성, 농기계특성, 농작업시 토양수분상태 등에 따라 다를 수 있다(Etana et al., 1999; Hamza and Anderson, 2005; Han et al., 2009; Raper, 2005; Raper and Mac Kirby, 2006). 그러나 용적밀도와 관입식경도의 측정은 현장에서 치밀도의 절대값을 제공하나 측정과정이 복잡하고 고가의 기기를 사용해야 하는 단점이 있어 농업인이 손쉽게 사용하기는 데 제약이 따른다. 한편 유효근권심의 진단 없이는 작물생육기간 동안 물과 비료의 공급이 효율적으로 이루어지기 어렵다.

부드러운 경운층 아래 쟁기바닥층과 같이 치밀한 층위가 나타나는 깊이는 가는 봉을 땅에 사뭇할 때 손에서 느껴지는 저항의 변화로도 감지할 수 있다. 특히 치밀한 층위에서도 휘어지지 않을 만큼 강도가 큰 스테인레스 스틸 재질을 이용하면 다양한 토양에서 활용이 가능할 것이다. 따라서 본 연구는 우리나라 토양 특성에 맞는 원추형 탐침봉을 제

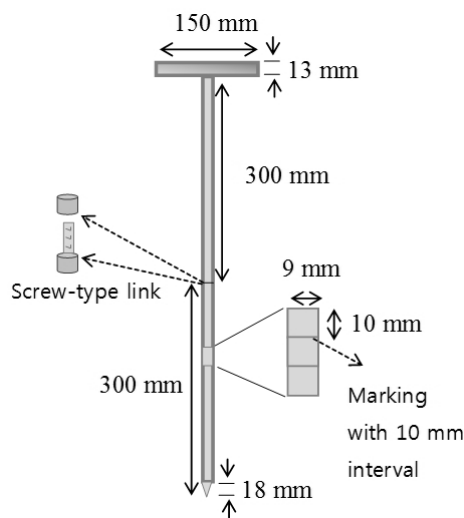
*Corresponding author: Tel: +82-63-238-2431
E-mail address: zhang@korea.kr

작하고 유효근권심을 현장에서 간편하게 진단하는 방법을 설정하고자 수행하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서 활용한 원추형 탐침봉의 재질은 스테인레스 스틸이며 규격은 Fig. 1과 같다. 길이는 600 mm로 중간에 나사형으로 300 mm씩 분리가 가능하게 제작하였다. 아래 끝 원추의 길이는 2 cm이며 원추의 각도는 25°-30°이다.

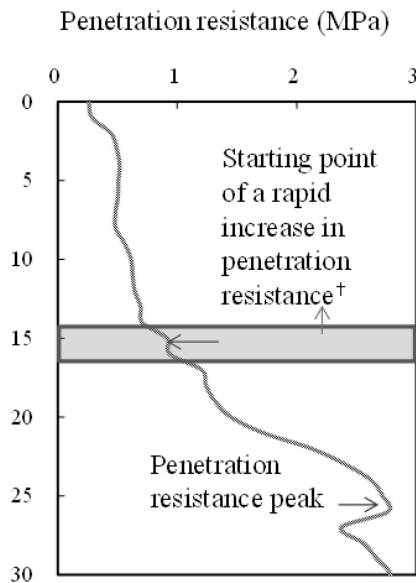
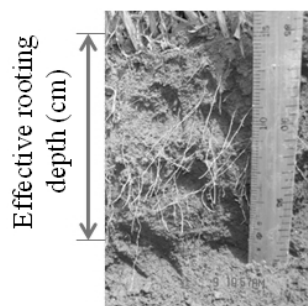
특히 10 mm 간격으로 눈금을 그려 관입깊이를 측정할 수 있도록 했다. 탐침봉의 관입깊이는 Fig. 1의 b와 같이 한 손으로 부드럽게 쥐고 힘을 살짝 가해 서서히 토양표면에서 관입시키면서 저항이 커지는 지점이 나타나면 멈추어 그 때 토양표면과 가장 일치하는 눈금을 읽어 측정하였다. 이는 Fig. 1의 c에서 관입저항이 커지기 시작하는 깊이에 상당하였다. 포장의 변이 및 실험오차를 고려하여 3반복 이상 측정하였다. 남녀를 포함한 실험자간 원추형 탐침봉 측정 쟁기바닥층 출현깊이 비교를 10반복으로 수행하였으며



(a) Cone probe prototype



(b) Testing example



(c) Determination of effective rooting depth and plow pan depth

Fig. 1. The cone probe prototype (a), testing example (b), and determination of effective rooting depth and plow pan depth (c).

Table 1. Soil textural family and cultivated crops of sites studied.

Site	Soil textural family	Crop	Site	Soil textural family	Crop
S1	Sandy	Perilla	S8	Coarse silty	Perilla
S2	Sandy	Peanut	S9	Fine loamy	Perilla
S3	Coarse loamy	Red pepper	S10	Fine loamy	Sweet corn
S4	Coarse loamy	Barley	S11	Fine loamy	Sweet corn
S5	Coarse loamy	Cucumber ¹⁾	S12	Fine silty	Chinese cabbage
S6	Coarse loamy	Cucumber	S13	Clayey (fine)	Sweet corn
S7	Coarse loamy	Perilla	S14	Clayey (fine)	Soybean

¹⁾Cultivated under plastic film house.

통계분석은 R 프로그램(R foundation, 2011) 던컨 다중검정을 실시하였다.

연구지점은 14지점으로 토성속이 사질에서 식질로 분포하였으며 재배작물은 들깨, 콩, 옥수수, 오이 등이었다 (Table 1). 오이의 경우 비닐하우스재배였으며 나머지는 모두 노지재배였다. 측정지점은 뿌리발달이 최고점에 다다른 작물 영양생장기 이후로 하였다.

연구지점에서 원추형 탐침봉의 관입깊이와 관입경도계 (Penetrologer, Eijkelkamp, NL)를 활용하여 관입식 경도를 측정하였다. 이후 토양단면을 약 50 cm 파서 Schoeneberger 등(2002)의 방법에 따라 단면의 뿌리분포를 파악하고 면적으로 뿌리가 70-80% 분포하는 깊이를 측정하였다 (Fig. 1 (c)). 뿌리가 분포하는 근권과 근권에서 5-10 cm 아래 심토에서 2인치 또는 3인치 코어를 채취하여 농업과 학기술원(2000)의 방법에 따라 용적밀도, 토양수분함량 등의 물리성과 pH, EC, 유기물함량, 치환성양이온함량 등의 화학성을 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

연구지점에서 근권과 쟁기바닥층은 용적밀도에서 차이를 나타냈는데 근권의 용적밀도는 $1.06-1.39 \text{ Mg m}^{-3}$, 쟁기바닥층의 경우 이보다 $0.1-0.3 \text{ Mg m}^{-3}$ 높게 나타났다. 수분함량의 경우 관입식 경도에 영향을 미치므로 과건과 과습을 피하였다. 근권 수분함량은 16.7-35.1%의 범위를 나타내었으며 노지재배의 경우 쟁기바닥층의 수분함량이 근권에 비해 유사하거나 높았다. 반면 시설오이재배지인 S5와 S6의 경우 근권이 쟁기바닥층에 비해 수분함량이 높게 나타났는데, 이는 관수가 주로 근권을 위주로 이루어지

기 때문에 판단된다. pH는 근권에서 5.0-7.0범위를 보였다. 염농도의 경우, S5에서 다른 토양에 비해 높게 나타났으나 오이재배를 위해 수분함량을 높게 유지하여 작물생육상태는 양호하였다. 치환성 칼슘의 경우 근권에서 $2.5-10.2 \text{ cmol kg}^{-1}$ 로 넓게 분포하였으며 근권이 근권하부 보다 높게 나타나는 지점이 많았는데, 이는 시비에 의해 칼슘공급이 높았기 때문으로 생각된다.

연구대상지점에서 원추형 탐침봉으로 측정된 쟁기바닥층 출현깊이와 유효근권심은 Table 3에 나타나 있으며 이중 조립질(S3)과 세립질(S11) 두 지점에 대해 측정자간 원추형 탐침봉 측정 쟁기바닥층 출현깊이의 차이를 Table 4에서 비교하였다. Duncan 다중검정 결과 측정자간 유의한 차이는 나타나지 않았다.

Fig. 2는 토성속이 다른 3지점에서 관입식 경도와 원추형 탐침봉으로 측정된 쟁기바닥층 출현깊이를 나타내고 있다. 토심 약 15 cm까지는 1 MPa이하의 관입식 경도를 보이다가 10 cm-20 cm 토심에서부터 관입식 경도가 증가하기 시작하여 토심 20-25 cm에서 1.5-2.5 MPa의 관입식 경도 피크를 나타내었다. 유효근권심은 S3에서 $15 \pm 1 \text{ cm}$, S9에서 $13 \pm 1 \text{ cm}$, S13에서 $13 \pm 1 \text{ cm}$ 로 나타났다. 즉 발작물의 뿌리는 관입식 경도 약 1 MPa이하에 주로 분포한다고 볼 수 있었다. JSA(1986)는 발작물 종류별로 산중식 경도로 뿌리신장제한기준을 제시하고 있다. 채소류는 다른 발작물에 비해 제한경도가 작은 값을 나타내는데, Han 등(2011)의 연구에서 채소류 뿌리신장 제한경도인 산중식 경도 18 mm가 관입식 경도계로 약 1 MPa에 해당한다고 밝힌 바 있으며, Silva 등(1994)은 2 MPa을 발작물 뿌리신장제한경도 기준으로 삼았다. Etana 등(1999)의 연구에서도 Håkansson(1990)의 방법을 이용한 쟁기바닥층의 다짐정

Table 2. Soil physico-chemical properties of sites studied.

Site	Bulk density Mg m ⁻³	Water content %, v/v	pH (1:5, H ₂ O)	EC (1:5) dS m ⁻¹	Organic matter content g kg ⁻¹	Exchangeable cations ----- cmol kg ⁻¹ -----				
						Ca	K	Mg	Na	
S1	Root zone	1.37	19.0	5.6	0.06	13	2.5	0.49	0.5	0.08
	Plow pan	1.57	23.5	5.4	0.04	6	2.0	0.09	0.4	0.05
S2	Root zone	1.23	25.4	5.7	0.11	26	7.5	0.58	1.5	0.02
	Plow pan	1.56	21.6	6.5	0.05	4	3.5	0.51	1.3	0.00
S3	Root zone	1.12	16.7	6.9	0.03	18	5.5	1.10	1.6	0.15
	Plow pan	1.39	26.7	6.3	0.02	3	2.2	0.38	0.9	0.12
S4	Root zone	1.27	27.8	5.7	0.04	16	3.6	0.46	0.4	0.03
	Plow pan	1.52	29.5	5.5	0.03	14	3.7	0.46	0.4	0.02
S5	Root zone	1.31	30.4	7.0	0.62	30	7.2	1.47	4.7	0.65
	Plow pan	1.44	17.4	7.1	0.30	8	4.6	0.87	2.8	0.38
S6	Root zone	1.24	31.2	7.0	0.37	35	6.9	1.59	3.3	0.38
	Plow pan	1.47	28.0	7.3	0.17	15	7.0	2.06	3.7	0.54
S7	Root zone	1.20	16.7	6.7	0.07	19	7.2	0.18	1.5	0.00
	Plow pan	1.53	17.5	6.1	0.03	4	1.9	0.21	0.9	0.00
S8	Root zone	1.15	29.9	5.0	0.03	22	2.9	0.49	0.8	0.14
	Plow pan	1.32	42.8	5.6	0.04	14	5.7	0.49	1.1	0.31
S9	Root zone	1.25	22.8	5.5	0.09	36	5.3	0.35	2.1	0.03
	Plow pan	1.43	20.6	5.3	0.05	26	2.8	0.39	2.0	0.02
S10	Root zone	1.06	22.5	5.9	0.28	33	10.2	1.02	2.8	0.03
	Plow pan	1.27	24.9	4.7	0.13	12	3.3	0.30	1.4	0.04
S11	Root zone	1.12	23.0	6.0	0.38	28	8.2	0.91	4.8	0.13
	Plow pan	1.61	27.6	6.2	0.23	22	8.6	0.54	4.1	0.14
S12	Root zone	1.31	22.7	5.6	0.05	18	6.9	0.17	2.8	0.06
	Plow pan	1.53	30.3	5.0	0.03	11	1.5	0.89	0.5	0.00
S13	Root zone	1.26	19.3	5.2	0.02	13	5.4	0.19	1.8	0.15
	Plow pan	1.54	32.8	5.1	0.02	7	7.5	0.18	3.1	0.18
S14	Root zone	1.39	35.1	5.6	0.07	24	7.1	1.13	1.7	0.04
	Plow pan	1.45	44.0	5.7	0.04	10	7.6	0.52	2.2	0.04

Table 3. Plow pan depth and effective rooting depth in study sites.

Site	Plow pan depth detected by CP ¹⁾			Effective rooting depth cm	Site	Plow pan depth detected by CP			Effective rooting depth cm
	Mean	SD ²⁾	CV ³⁾			Mean	SD	CV	
	cm	cm	%			cm	cm	%	
S1	13	2.0	16	12±1	S8	11	2.0	18	12±1
S2	15	2.5	17	15±1	S9	13	2.5	19	13±1
S3	15	1.5	10	15±1	S10	17	1.0	6	14±1
S4	15	3.5	23	13±1	S11	19	1.4	7	16±1
S5	22	4.2	19	20±2	S12	16	1.5	10	15±1
S6	23	0.6	3	17±1	S13	15	1.2	8	13±1
S7	13	2.1	16	12±1	S14	16	2.1	13	13±1

¹⁾Cone probe; ²⁾Standard deviation; ³⁾Coefficient of variation.

도가 경도로 약 2 MPa에 해당됨을 보였다.

시설재배인 S5와 S6에서 근권 및 쟁기바닥층의 관입식 경도 또한 노지재배와 유사한 형태를 나타내었으나 관입식 경도가 증가하는 깊이가 더 깊었다(Fig. 3). 이는 시설재배는 노지재배와 달리 심경을 하여 같이 깊이가 더 깊기 때문

으로 생각된다. 또한 노지재배에 비해 쟁기바닥층 출현깊이에서 경도 증가가 더 급격하게 나타났다. 이는 시설오이의 경우 연 3작이 이루어져 경운횟수가 잦고 강우가 차단된 조건에서 노지에 비해 점적관수로 수분이 적게 공급되어 상대적으로 심토의 수분함량이 낮기 때문으로 판단된다.

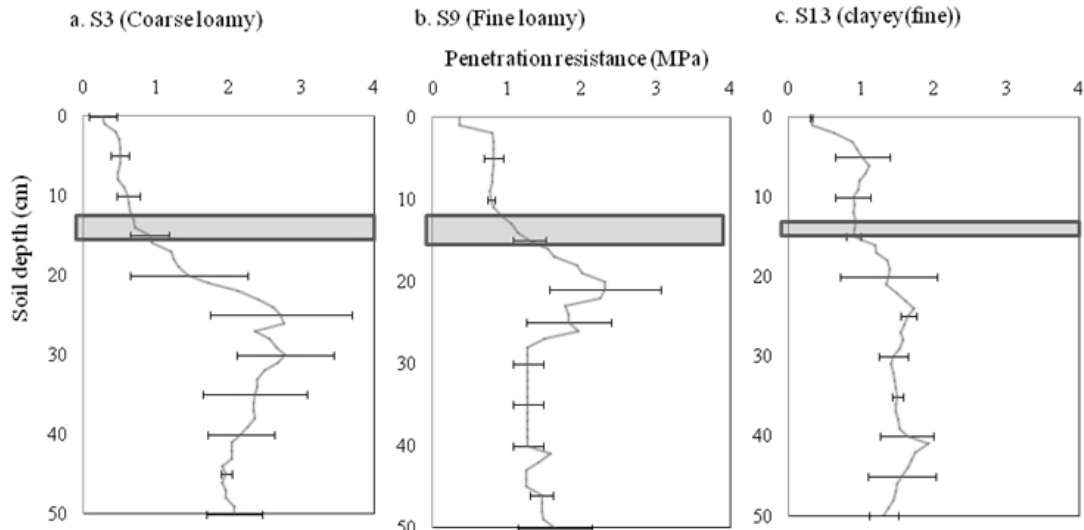


Fig. 2. Plow pan depth detected by cone probe (▬) and penetration resistance profile as affected by different soil textural families. Horizontal bars indicate standard deviations of the means.

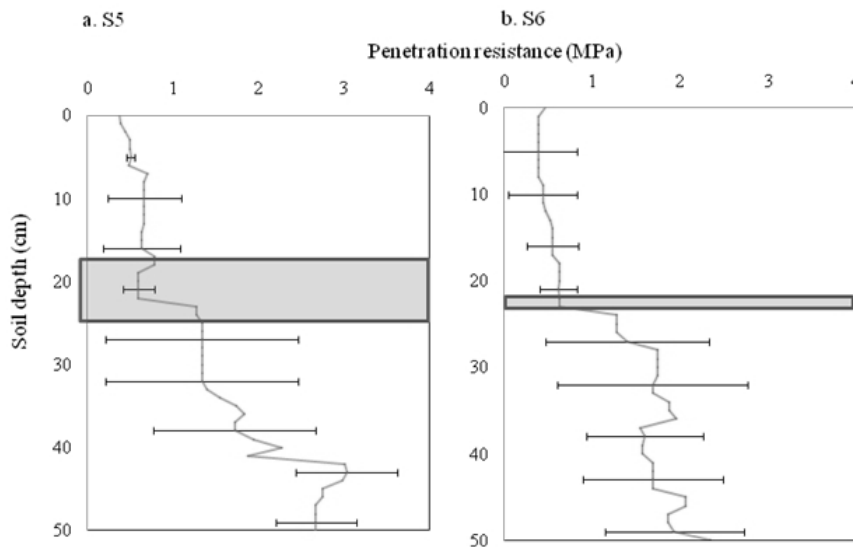


Fig. 3. Plow pan depth detected by cone probe (▬) and penetration resistance profile for cucumber cultivated sites under plastic film house. Horizontal bars indicate standard deviations of the means.

Table 4. Comparisons of plow pan depth detected by CP between different users at Sites 3 and 11.

	User 1	User 2	User3	User 4
S3	15.1 ^{a1)}	14.8 ^a	14.8 ^a	15.5 ^a
S11	18.6 ^b	18.6 ^b	19.5 ^b	19.6 ^b

^{a)}Means with the same letter are not significantly different using Duncan's test.

원추형 탐침봉으로 진단한 쟁기바닥층 출현깊이는 노지 재배에서 11-19 cm로 분포하였으며 평균 15 cm를 나타내었으며, 토성속간의 차이는 크게 나타나지 않았다(Table 3). 시설재배오이의 경우 평균 23 cm를 나타내어 노지재배보다 깊었는데, 이는 심경 때문으로 보인다. 노지재배의 쟁기

바닥층 출현깊이는 Choi 등(2000)의 연구에서 보고한 농업인들이 주로 선택하는 갈이깊이 15 cm와 유사한 값을 나타내고 있다. Etana 등(1999)은 스웨덴 토양에서 갈이깊이를 심경에서 24±29 cm, 천경에서 12-15 cm로 하여 갈이깊이에서 치밀성이 큰 다짐층이 나타나는 것을 밝혀 본 연구와

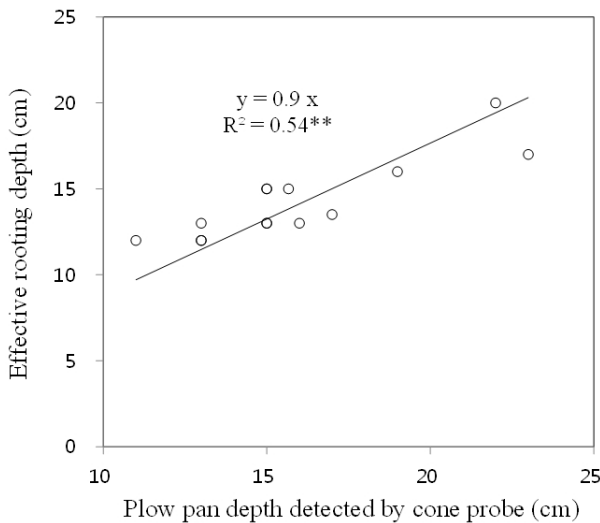


Fig. 4. The relationship between plow pan depth and effective rooting depth of upland crops.

유사한 결과를 보였다. 단, 근권주위에 토성급변층이 존재 하거나 얇은 지하수위 등으로 수분함량이 포화에 가까울 정도로 높은 밭은 관입식 경도를 통한 쟁기바닥층 진단에서 제외할 필요가 있다. 이는 관입식 경도가 토성 및 수분함량 등의 영향을 받아 그 값이 달라지기 때문이다(Kumar et al., 2012; Tekeste et al., 2006). 돌이나 자갈이 많은 토양 또한 탐침봉을 사봉하기 어려워 쟁기바닥층 진단에서 제외할 필요가 있다.

유효근권심은 쟁기바닥층 출현깊이보다 얇게 나타났는데, 노지재배에서 12-16 cm로 분포하였으며 평균 14 cm였고 시설재배오이에서 평균 19 cm를 나타냈다. 유효근권심은 쟁기바닥층 출현깊이와 정의 유의한 상관관계를 나타내었다 (Fig. 4). 회귀식은 Y절편을 0으로 하였을 때 [유효근권심] = 0.9 x [쟁기바닥층 출현깊이]로 결정계수 0.54였다. 이 회귀식의 적용 범위는 쟁기바닥층 출현깊이 10-25 cm였다.

결론적으로, 본 연구를 통해 현장에서 토양을 교란하지 않고 원추형 탐침봉을 통해 쟁기바닥층의 출현깊이를 진단하여 유효근권심을 추정하는 방법을 개발하였다. 현장에서 정확한 진단을 위해서는 공간적 변이를 고려한 적당한 반복수의 결정과 포장용수량 부근의 수분상태가 중요하다 할 수 있다.

IV. 결론

작물 유효근권심은 원추형 탐침봉의 관입깊이(한손으로

서서히 관입시켜 저항이 커질 때 멈춤)와 정의 상관관계를 가져 이를 이용하여 유효근권심을 진단하였다. 그 식은 다음과 같다.

[유효근권심] = 0.9 x [탐침봉 관입깊이]. 단, 탐침봉 관입깊이가 10-25 cm일 때로 제한하며 지하수위가 얇거나 배수불량토양, 자갈이 많은 토양은 제외한다.

현장에서 탐침봉으로 간편하게 진단한 유효근권심은 물주기 및 비료시용 등을 필지특성에 맞게 관리하는데 활용할 수 있다. 또한 동일한 필지에서도 농기계가 회전하는 부분 등에서는 다짐이 커 유효근권심이 상대적으로 얇게 나타날 수 있는데, 현장진단을 통해 이를 고려한 토양관리가 이루어질 수 있다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ010936)의 지원에 의해 이루어진 것임.

참고 문헌

Atkinson D. 2000. Root characteristics: Why and What to Measure. Chapter 1. pp 1-32 *In* Root methods: a handbook Edited by Smit AL Springer.

Chen G., Weil RR. 2011. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil and Tillage Research* 117:17-27.

Choi SW, Wu YG, Kim KU. 2000. Prediction of tillage workability by cone index. *KSAM* 25(3):195-202.

Da Silva AP, Kay BD, Perfect E. 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1775-1781.

Etana A, Håkansson I, Zagal E, Bucas S. 1999. Effects of tillage depth on organic carbon content and physical properties in five Swedish soils. *Soil and Tillage Research* 52:129-139.

Håkansson I. 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research* 16:105-120.

Hamza M, Anderson W. 2005. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* 82:121-145.

Han KH, Cho HJ, Lee HS, Hur SO, Hur SK. 2009. Relationship between water stable aggregate and macroporosity in upland soils calculated by fragmentation fractal dimension. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42:58-64.

- Han KH, Cho HR, Jeon SH, Zhang YS. 2011. A study of relation between Yamanaka hardness and penetrometer cone index. *Korean J Soil Sci Fert* 44:344-346.
- Japanese Soil Association. 1986. Agricultural environmental Indicator, Part 1. Soil environment, by Japanese Soil Association.
- Kim LY. 2007. Definition of soil tillage and crop root zone. *In* Technical support for crop cultivation, by Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Republic of Korea.
- Kumar A, Chen Y, Sadek MAA, Rahman S. 2012. Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 14:26-37.
- NIAST. 2000. Method of soil and plant analysis. Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Republic of Korea.
- Raper R. 2005. Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics* 42:259-280.
- Raper RL, Mac Kirby J. 2006. Soil compaction: How to do it, undo it, or avoid doing it. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- R foundation. 2011. R version 2. 13. 0., The R foundation for statistical computing.
- Schoeneberger PJ, Wysocki DA, Benham EC, Broderson WD. 2002. Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. USA.
- Tekeste MZ, Raper RL, Tollner E, Seymour L. 2006. Optimal spatial sampling schemes for mapping soil strength on a Southeastern US soils. ASABE Paper.