

유기농 시설채소 재배지 토양의 물리적 특성변화*

이상범** · 최원아*** · 홍승길*** · 박광래*** · 이초룡** · 김석철*** · 안민실***

Physical Properties of Organic Vegetable Cultivation
Soils under Plastic GreenhouseLee, Sang-Beom · Choi, Won-A · Hong, Seung-Gil · Park, Kwang-Lai ·
Lee, Cho-Rong · Kim, Seok-Cheol · An, Min-Sil

This study was conducted to determine the effects of organic vegetable cultivation on the soil physical properties in 33 farmlands under plastic greenhouse in Korea. We were investigated 5~8 farms per organic vegetable crops during the period from August to November 2014. The main cultivated vegetables were leafy lettuce (*Lactuca sativa* L.), Perilla leaves (*Perilla frutescens* var. *Japonica* Hara), cucumber (*Cucumis sativus* L.), strawberry (*Fragaria ananassa* L.) and tomato (*Lycopersicon* spp.). We have analyzed soil physical properties. The measured soil physical parameters were soil plough layer, soil hardness, penetration resistance, three soil phase, bulk density and Porosity. The measurement of the soil plough layer, soil hardness and penetration resistance were carried out direct in the fields, and the samples for other parameters were taken using the soil core method with approximately 20 mm diameter core collected from each organic vegetable field. Soil plough layer was average 36 cm and ranged between 30 and 50 cm, and slightly different depending on the sorts of vegetable cultivation. The soil hardness was $0.17 \pm 0.15 \sim 1.34 \pm 1.02$ in the topsoil, $0.55 \pm 0.34 \sim 1.15 \pm 0.62$ in the subsoil. It was not different between topsoil and subsoil, but showed a statistically significant difference between the leafy and fruit vegetables. Penetrometer resistance is one of the important soil physical properties that can determine both root elongation and yield. The increase in density under leafy vegetables resulted in a higher soil penetrometer resistance. Soil is a three-component system comprised of solid, liquid, and gas phases distributed in a complex geometry that creates large solid-liquid, liquid-gas, and gas-solid interfacial areas. The three soil phases were dynamic

* 본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발 사업(과제번호: PJ01010903)의 연구비 지원으로 수행되었음.

** Corresponding author, 농촌진흥청 국립농업과학원 유기농업과(korealee@korea.kr)

*** 농촌진흥청 국립농업과학원 유기농업과

and typically changed in organic vegetable soils under greenhouse. Porosity was characterized as range of $54.2 \pm 2.2 \sim 60.3 \pm 2.4\%$. Most measured soils have bulk densities between 1.0 and 1.6 g cm^{-3} . To summarize the above results, Soil plough layer has been deepened in organic vegetable cultivation soils. Solid hardness (the hardness of the soil) and bulk density (suitable for the soil unit mass) have been lowered. Porosity (soil spatial content) was high such as a well known in organic farmlands. Important changes were observed in the physical properties according to the different vegetable cultivation. We have demonstrated that the physical properties of organic cultivated soils under plastic greenhouse were improved in the results of this study.

Key words : *organic farming, soil physical property, three soil phase, bulk density, organic vegetable*

I. 서 론

관행농업은 생산성을 중시하여 세계의 식량을 공급하는 중요한 역할을 담당하고 있으나 유기합성 농약이나 화학비료의 집약적 투입에 의존하고 있다. 장기간 과도한 화학합성 물질 투입에 의한 영농활동은 결국 농경지 토양의 유기물 분해력을 비롯한 물리성 저하를 초래하게 되고(Gajić, 2013), 생물 다양성을 감소(Larsen et al., 2014)시키며, 토양의 생산성도 떨어져 지속적인 작물 수량을 유지하기 어렵게 만든다(Shipitalo and Protz, 1987; Prasad, 1996).

유기농업은 윤작, 두과작물, 심근성 작물 및 녹비작물 재배 등으로 지속적인 작물 생산성을 가능케 하는 대안농업이며, 환경을 보전할 수 있는 농업의 한 형태(Padel et al., 2009; Meier et al., 2015)로 제시되고 있어 세계적으로 빠른 확산 추세에 있으나 유기농업 실천에 따른 어려운 점의 하나는 어떻게 작물 생산성 저하(Stanhill, 1990)를 해결해야만 하는 과제가 아직도 남아 있다. 그럼에도 불구하고 유기농업을 연구하는 많은 과학자들은 토양의 이화학적 특성과 생물학적 특성 개선효과(Bulluck III et al., 2002)를 비롯한 생물 다양성 증진(Hole et al., 2005), 토양 건전성 유지(Bruggen et al., 2015), 지속적인 작물생산성 유지, 온실가스 배출량 저감(Cooper et al., 2011) 등 유기농업에 따른 긍정적 효과들에 대한 연구결과들을 보고(Nair and Ngouajio, 2012; Crittenden et al., 2015)하고 있다.

따라서 이러한 이유들과 더불어 웰빙에 따른 안전농산물 요구도가 높아지면서 전 세계적으로 유기농업 실천은 과거 10년 동안 20% 이상 증가하여 43백만 ha에 달하고(FiBL and IFOAM, 2015) 있다. 국내에서도 2011년 제17차 국제유기농업운동연맹(IFOAM, International Federation of Organic Agriculture) 세계유기농대회(OWC, Organic World Congress) 한국 유치를 계기로 하여 급격히 활성화 되고 있다.

유기농업은 FAO/WHO에서 Codex guideline에 세부적으로 실천기술과 원칙들에 관하여

규정하고 있으며, 이를 바탕으로 국가마다 Codex 규정을 기본적으로 준수하고 있다. 그러나 기후 등 자국의 상황에 따라 자연환경, 농경지 규모 및 재배작물 등을 비롯한 유기농업에 대한 실천 철학과 지식에 차이가 있어 적용 기술과 실천방법들이 유기농업 발원지인 유럽이나 선도국과는 다소 차이가 있다.

우리나라 유기농업은 1970년도 후반에 민간단체에서 시작되었으나 국가 차원의 유기농업활성화는 2000년부터 시작되었다. 유기농업에 대한 법적인 근거는 환경농업육성법이 제정(1997.12.13)되고, 친환경농업육성법으로 개칭(2001.1.26.)된 후 다시 친환경농업육성법과 수산물품질관리법 및 식품산업진흥법을 통합하여 친환경농어업 육성 및 유기식품 등의 관리·지원에 관한 법률로 전부개정(2012.6.1)하였다. 이러한 법적 근거를 바탕으로 2004년부터 농촌진흥청에서 유기농업 연구를 본격적으로 시작하였으나 과학적 연구기간도 짧고, 유기농업자재 위주의 실천기술 적용으로 여러 가지 문제점들이 아직도 대두되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 유기농업 실천에 따른 다양한 효과들 중에서 토양의 물리적 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 관하여 국내의 유기농 시설채소재배 선도농가들을 대상으로 조사를 실시하였다. 이러한 연구들을 통하여 유기농업의 공익적 기능을 평가하고, 올바른 유기농업 실천을 위한 토양관리 기술 및 유기농업 직불금 지원을 위한 정책에 활용할 수 있는 기초자료를 축적하고자 본 연구를 수행하였다.

II. 재료 및 방법

본 시험은 국립농산물품질관리원에서 추천한 유기농 선도농가와 시험목적에 부합되는 자체 검토한 주산단지 및 지역을 고려하여 일정규모 이상의 재배면적을 가진 유기농 시설채소 재배지를 대상으로 실시하였다. 토양의 물리적 특성조사는 Fig. 1과 같이 전국 33개 유기농 채소재배 농가 포장에서 2014년 8월부터 11월 사이에 작물 수확 전·후에 토양을 조사하였다.

시설채소 재배지 선정은 엽채류인 상추(*Lactuca sativa* L.)와 잎들깨(*Perilla frutescens* var. *japonica* Hara), 과채류인 오이(*Cucumis sativus* L.), 딸기(*Fragaria ananassa* L.), 토마토(*Lycopersicon* spp.)를 주로 재배하는 유기농 채소 종류별로 각각 5~8개 선도 농가를 선정하여 작토심, 경도, 관입저항성 삼상 및 용적밀도 등 토양의 물리적 특성을 현장조사와 실험실내에서 분석하여 평가하였다.

토양의 물리적 특성분석은 0~15 cm의 표토와 16~30 cm의 심토로 구분하여 토양경도와 작토심은 농가포장에서 직접 측정하였다. 토양 삼상과 공극률 및 용적밀도는 필지별 3개 지점에서 Core법으로 토양시료를 채취하여 실험실로 가져와 분석에 사용하였다.

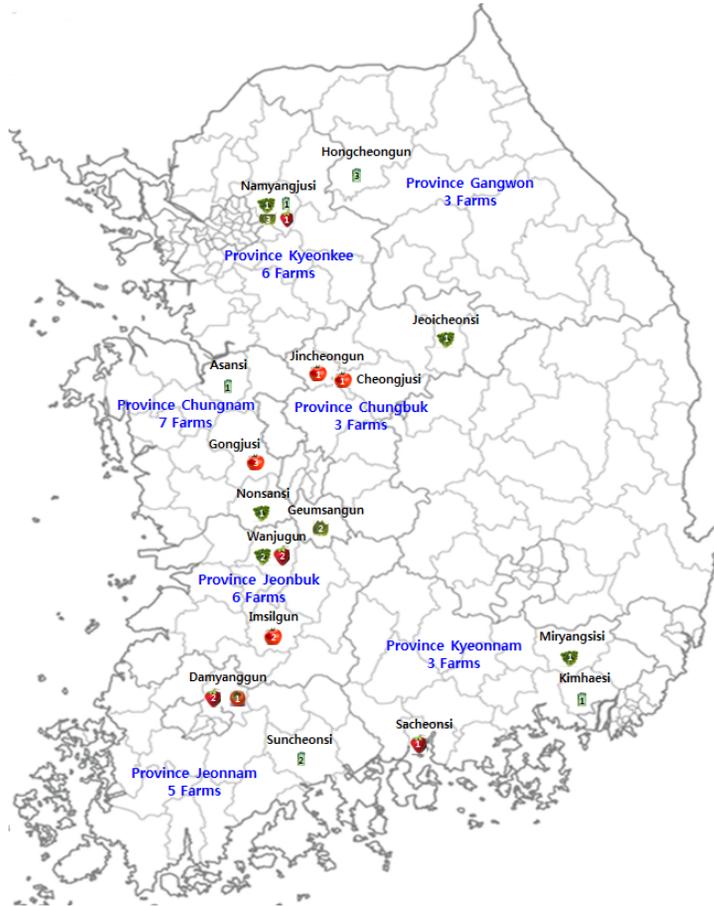


Fig. 1. Soil sampling site in organic vegetable cultivation under greenhouse.

토양 경도는 토양경도계(Soil hardness tester, Takemura Electric Works, LTD Model SHM-1)를 사용하여 3회 평균값을 $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 로 측정하였고, 작토심은 국립농업과학원에서 제작한 손잡이 150 mm, 길이 60 mm, 굵기 12 mm, 원추의 길이 20 mm의 탐침봉을 사용하여 현장에서 직접 측정하였다. 토양의 관입저항성은 디지털 관입식경도계(Eijkelkamp, NL-19.33)를 이용하여 측정하였다.

토양의 삼상, 공극률 및 용적밀도(bulk density) 등의 물리적 특성분석은 토양이 교란되지 않도록 100 cm^3 용량을 가진 코어(Eijkelkamp, Netherlands)로 3반복 채취하여 진동이 없도록 조심스럽게 운반한 시료를 가지고 실험실에서 분석하였다. 통계처리는 Excel 프로그램을 이용하여 표준편차를 구하였고, 유의성 검증은 Duncan's multiple range test를 사용하여 비교하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 유기농 시설재배지 토양의 작토심과 경도

1) 토양의 작토심(Soil plough layer)

채소재배 종류별 시설 유기농경지 토양의 작토심을 조사한 결과는 Fig. 2와 같이 유기농업 선도국 토양에서 나타나는 현상(Bulluck et al., 2002)과 유사하게 작토심이 깊게 형성되어 있었다. 관행농경지 토양의 작토심인 15~20 cm 보다 깊은 평균 36 cm이고, 대부분 30~50 cm 범위에 있었고, 재배되는 채소의 종류에 따라서 차이가 있었다. 엽채류에서는 결정계수(회기직선의 기대율 R^2) 값이 크고, 한곳으로 집중되어 나타나지만 과채류에서는 결정계수 값이 낮아 넓게 분포되어 엽채류와 과채류 재배에 따라 차이가 컸다. 이러한 현상들은 양분부족에 대한 우려로 다량의 유기물들을 토양 깊숙이 투입하고, 대형 농기계를 이용하여 3~7회의 잦은 경운으로 작토심이 깊어진 것에도 원인이 있지만 근본적으로는 빈번한 엽채류의 수확 강도에 따른 인부들의 답압효과에 의하여 편차가 발생하는 것으로 판단된다. 수확할 때에 상추나 잎들깨는 전체 면적을 밟고 수확하는데 비하여 오이, 딸기, 토마토는 이랑사이를 다니며 수확이 이루어지기 때문에 엽채류 재배 포장의 작토심에 영향이 크다고 하겠다.

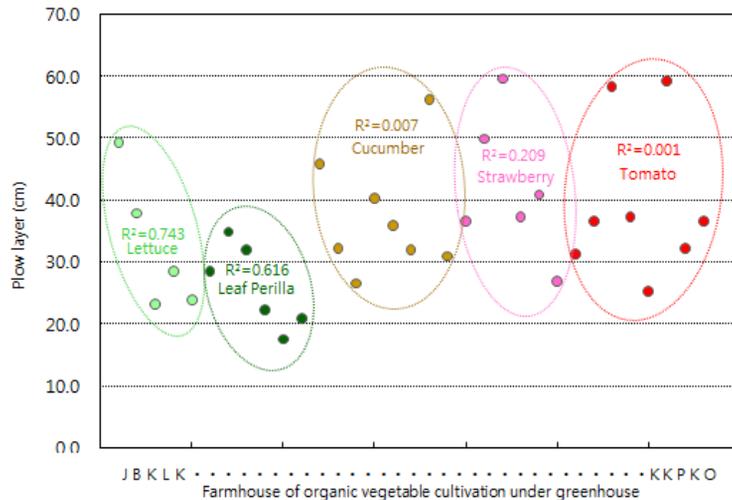


Fig. 2. Changes of soil plough layer formation in different organic vegetable cultivation under greenhouse.

또한 유기농 재배 채소종류에 따라서 재배방법, 양분공급, 경운형태 등 토양관리 방법과

기술이 다양하고, 경종적 표준재배 방법이 설정되어 있지 않아 농가마다 다년간 경험에 의존하게 됨으로 토심의 변이폭도 크게 나타나게 된다. 토심은 강우 등과 관련하여 수분 유지와 배수에도 영향을 주어 작물 생산성을 지속시키고, 토양의 물리적 특성의 다양한 변화에 중요한 역할을 가지고 있다고 보고(Bertolino et al., 2010) 하였고, 기계적 하중 강도에 의해서도 영향을 받아 곡물 생산량에 영향을 주기 때문에 유기농업에서 특히 경작 깊이의 중요성을 강조(Gronle et al., 2015)하고 있다.

2) 토양경도(Soil hardness)

토양경도는 토양입자 사이의 응집력과 입자간의 마찰력에 의해서 생기는 것으로서 입경 조성, 공극량, 충전밀도, 토양수분 등을 종합적으로 평가할 수 있는 요소로서 점토함량, 유기물함량, 토양구조의 발달, 수분함량 등과 밀접한 관계가 있다(Gronle et al., 2015; Herencia et al., 2011). 일반적으로 토양이 건조되거나 답압에 따라 경도에 차이가 발생하게 되며, 토양이 경화되면 뿌리의 신장이 저해되거나 물의 이동이 쉽게 이루어지지 않아 작물의 생육이 불량하게 된다.

Table 1에서와 같이 시설재배지 유기농 채소재배 토양의 경도는 표토에서 $0.17\pm 0.15\sim 1.34\pm 1.02$, 심토에서 $0.55\pm 0.34\sim 1.15\pm 0.62$ 로 모두 매우 우수하였으며, 표토와 심토간에는 큰 차이가 없었으나 엽채류와 과채류간에는 통계적으로 유의적인 차이를 나타내었다. 유기농 시설채소 재배지의 토양 경도가 매우 양호하게 유지되는 이유는 노지와는 달리 외부환경의 영향이 적고, 유기물 투입이 많고, 잦은 경운, 고풍재배 및 지속적인 관수에 의하여 토양구조가 느슨해지는 영향에 기인된다고 하겠다.

Table 1. Soil hardness in organic vegetable cultivation under greenhouse

Main vegetable crops	Soil hardness (kg · cm ²)	
	Topsoil (0~15 cm)	Subsoil (16~30 cm)
Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.)	0.92±0.63 ^{b*}	1.15±0.62 ^b
Leaf Perilla (<i>Perilla frutescens</i> spp.)	1.34±1.02 ^b	1.04±0.50 ^b
Cucumber (<i>Cucumis sativus</i> L.)	0.42±0.28 ^a	0.98±0.74 ^{ab}
Strawberry (<i>Fragaria ananassa</i> L.)	0.54±0.54 ^{ab}	0.59±0.28 ^a
Tomato (<i>Lycopersicon</i> spp.)	0.17±0.15 ^a	0.55±0.34 ^a

* Significantly different at P<0.05

3) 관입저항성(Penetration resistance)

관입저항성은 뿌리의 신장과 작물수량에 미치는 영향과 높은 정의 상관관계를 가지는

중요한 토양 물리적 특성중의 하나(Weida Gao et al., 2016)이다.

관입저항성은 경운 깊이, 농기계 하중(Gronle et al., 2015) 및 수분함량, matric 잠재력, 입자크기 등의 영향(Whalley et al., 2007)을 크게 받게 된다. 유기농 시설재배지에서 주요 채소재배 종류별 관입저항성을 측정된 결과는 Fig. 3과 같다. 노지와는 달리 시설재배지는 주로 논에서 전환된 지역이 대부분으로 토양들의 입자가 균일하고 미세하며, 유기물 함량도 높고 지속적인 관주로 인하여 관입저항성이 낮았다. 그러나 재배되는 채소의 종류에 따라 토양 활용형태 방법과 수확빈도에 따른 답압의 차이로 상추와 잎들깨 재배 엽채류에서 토양 깊이별 관입저항성이 오이와 딸기재배 과채류보다 높은 결과를 나타내었다. 시설재배지에서 엽채류와 과채류간 관입저항성의 차이가 나타날지라도 채소생육과 수량에 있어 중요한 제한요인으로 작용되지는 않을 것으로 판단된다.

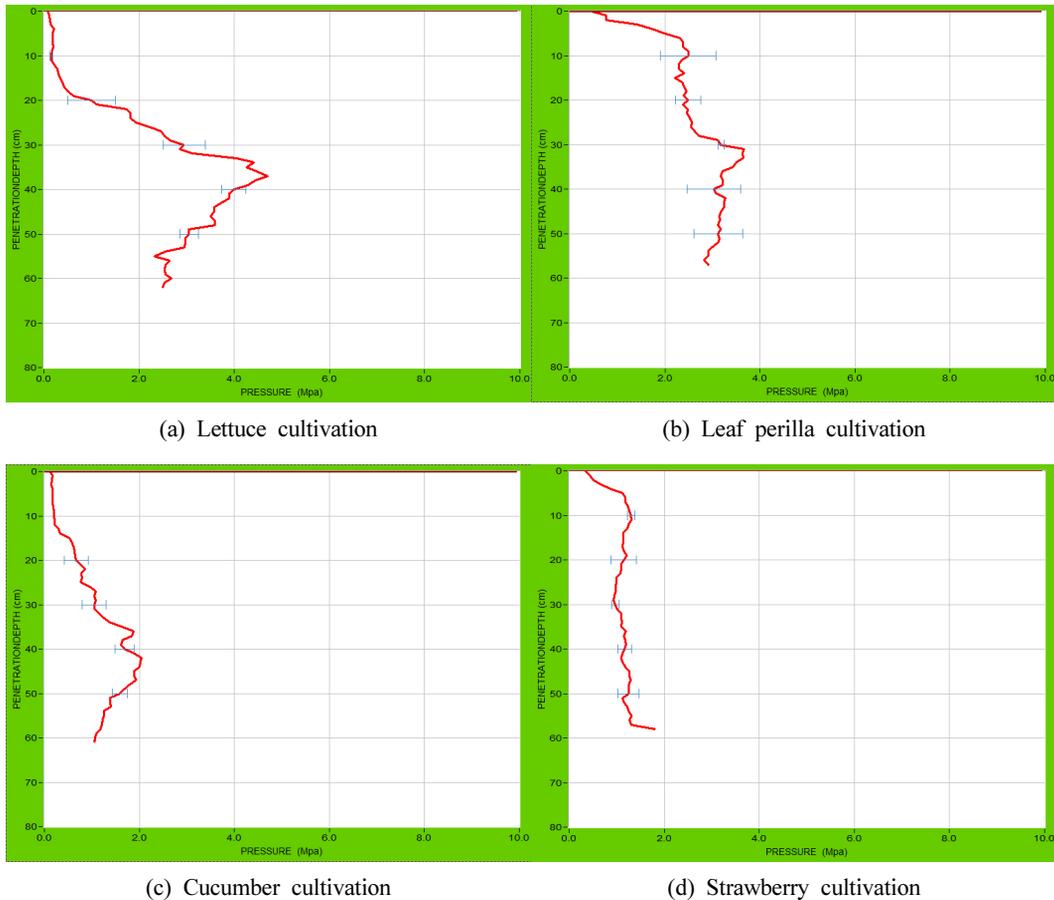


Fig. 3. Change of mean penetration resistance under greenhouse with organic vegetable cultivation in spring 2014.

2. 토양의 삼상구조와 용적밀도

1) 토양의 삼상구조와 공극률(Three soil phase and Porosity)

토양은 고상, 액상, 기상으로 구성되어 고상-액상, 액상-기상, 기상-고상의 상호 계면영역 시스템으로 토양에서 일어나는 작용들이 마치 블랙박스와도 같다. 토양의 삼상지표(TSPI, three soil phase index)는 Cobb-Douglas (Charles Cobb and Paul Douglas theory) 생산 함수로 표현되는 한계생산성의 감소되는 개념을 이용하여 고상, 액상, 기상을 기초로 한 중간토성의 물리적 상태를 특성화하는데 까지 발전시켰다(Wang et al., 2015). 또한 Wang 등(2015)은 토양 삼상지표 TSPI는 $[(X_s-C) X_L X_G]^N$ 로 정의하였으며, C와 N은 주어진 토양에 대한 상수, X는 토양상의 체적 비율이고, 아래 첨자 S, L 및 G는 각각 고상, 액상 및 기상으로 나타내었다. 이 TSPI는 용적밀도, 산소의 확산속도, 산화환원전위 및 곡물 수량과 고도의 정상관 관계가 인정되어 삼상조건에 대한 토양 관리방법의 효과를 평가할 수 있다.

토양 시스템의 기초를 이루고 있는 고상, 액상, 기상 및 공극률에 대하여 2014년 가을 작물재배 시점을 기준으로 상추, 잎들깨, 오이, 딸기, 토마토를 주작물로 재배하고 있는 유기농 시설재배지 토양의 삼상과 공극율을 분석한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Three phases of surface soil in organic vegetable farming

Main vegetable crops	Solid phase (%)	Liquid phase (%)	Gas phase (%)	Porosity (%)
Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.)	45.6±2.2 ^a	24.0±3.9 ^a	30.4±1.9 ^a	54.2±2.2 ^a
Leaf perilla (<i>Perilla frutescens</i> spp.)	40.3±0.7 ^a	32.2±2.0 ^a	27.5±2.2 ^a	59.8±0.8 ^a
Cucumber (<i>Cucumis sativus</i> L.)	39.8±2.4 ^a	25.5±3.9 ^a	34.6±2.9 ^a	60.3±2.4 ^a
Strawberry (<i>Fragaria ananassa</i> L.)	41.1±2.2 ^a	26.5±3.3 ^a	32.4±2.6 ^a	58.7±1.1 ^a
Tomato (<i>Lycopersicon</i> spp.)	43.1±1.7 ^a	27.1±2.9 ^a	29.8±2.1 ^a	56.9±1.7 ^a
Minimum	26.9	1.9	21.0	47.2
Maximum	52.8	38.1	41.5	73.1

* Significantly different at P<0.05

고상, 액상, 기상 및 공극율은 채소재배 종류에 따른 유의적인 차이가 없었다. 유기농 시설재배지 토양의 고상은 평균 39.8~45.6% 범위로 낮았고, 가장 낮은 농가는 26.9%로 유기농업의 실천 취지와 철학에 적합하지 않았다. 액상은 평균 24.0±3.9~32.2±2.0% 범위로 최소 11.9%에서 최대 38.1%를 차지하였다. 액상 비율이 매우 낮은 농경지는 과채류인 토마토 재배농가 토양에서 나타났으며, 그 원인은 당도를 높이기 위하여 건조상태를 유지하였기 때문이었다. 일부 유기농업 실천농가의 작물재배 방법은 소비자들의 기호에 따라서 결정되고

있었다. 유기농 시설재배지 토양의 삼상분포 구조의 특성으로 인하여 공극률도 최소값이 47.2%에서 최대값이 73.1%로 농가에 따라 편차가 많았으며, 평균 $54.2 \pm 2.2 \sim 60.3 \pm 2.4\%$ 범위로 높은 경향을 나타내었다. 이상과 같이 유기농 시설재배지 토양의 삼상구조와 공극율이 농가에 따라 편차가 크게 나타나고 있으나 평균적으로 공극률(토양속 공간 함유율)이 높아지는 등 유기농 채소재배 토양의 물리성을 개선하는 효과가 있다는 것을 볼 수 있었다.

2) 용적밀도(Bulk density)

용적밀도는 특히 탄소 인벤토리 수행을 위하여 필수적이며, 인위적인 영향에 대한 토양의 압축상태를 알기위한 지표로 사용되고 있다. 일부에서는 육상생태계 영역의 토양과 양분상태의 정량화에 매우 중요하게 활용되기도 한다(Sequeira et al., 2014). 대부분의 무기질 토양의 용적밀도는 $1.0 \sim 2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 사이에 놓여 있으며, 압축된 토양은 $<1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 이하로 낮고, 우수한 토양은 $1.4 \sim 1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 사이에 놓이게 된다(Blake and Hartge, 1986).

유기농 시설재배지 토양의 용적밀도는 Fig. 4에서 보는바와 같이 농가와 수확 방법의 빈도로 인하여 어떠한 채소를 재배하느냐에 따라서 차이가 있었으며, 평균 $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 을 나타내었다. 일부 유기채소 농가에서는 $<1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 이하로 낮아 녹비작물 재배나 답압에 따른 토양관리가 필요할 것으로 사려된다. 농경지 토양의 답압은 뿌리 발육에 부정적인 영향으로 작물생산성을 저하시키기 때문에 농기계의 대형화와 더불어 전 세계적인 관심사가 되고 있다(Schafer et al., 1992). 용적밀도 등 토양의 물리성 개선을 위하여 뿌리가 1.5 m까지 내리려 수직 토심을 깊게 만드는데 유리한 호밀이나 표토층 전체의 물리성을 좋게 하는데 유리한 청보리 등 녹비작물을 재배하는 기술을 접목하면 유리할 것으로 판단된다.

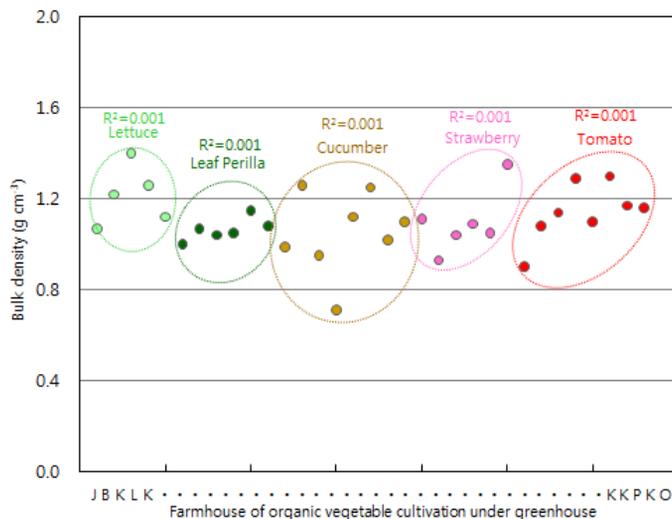


Fig. 4. Changes of bulk density in different organic vegetable cultivation under greenhouse.

유기농 시설채소 재배지 토양의 용적밀도는 정의 상관관계를 나타내지만 결정계수(회기 직선의 기대율) $R^2=0.001$ 로 매우 낮게 나타났고, 넓게 분포되는 것으로 볼 때 어떤 종류의 채소를 재배하든 토양의 용적밀도에 미치는 영향이 크지 않았다.

IV. 적 요

유기농 시설채소 재배지 토양의 물리적 특성조사는 전국 33개 농가 포장에서 2014년 8월 부터 11월 사이에 조사하였다. 시설채소 재배지 선정은 엽채류인 상추(*Lactuca sativa* L.)와 잎 들깨(*Perilla frutescens* var. *japonica* Hara), 과채류인 오이(*Cucumis sativus* L.), 딸기(*Fragaria ananassa* L.), 토마토(*Lycopersicon* spp.)를 경작하는 채소 종류별 5~8개 농가씩 선정하여 경 도, 작토심 및 삼상 등 토양의 물리적 특성을 현장조사와 실험실내에서 분석하였다.

연구결과 작토심은 30~50 cm 범위로 평균 36 cm이었고, 재배되는 채소의 종류에 따라서 다소 차이가 있었다. 토양의 경도는 표토에서 $0.17\pm 0.15\sim 1.34\pm 1.02$, 심토에서 $0.55\pm 0.34\sim 1.15\pm 0.62$ 로 모두 매우 우수하였으며, 표토와 심토간에는 큰 차이가 없었으나 엽채류와 과채류 간에는 통계적으로 유의적인 차이를 나타내었다. 관입저항성은 뿌리 신장과 작물 수량을 결정짓는 토양의 물리적 특성중의 하나이다. 관입저항성은 엽채류 재배지에서 답압으로 인 하여 다소 높게 나타났다. 토양의 삼상은 유기농 시설재배지 토양에서 동적이고, 전형적으로 변화되었다. 공극률은 $54.2\pm 2.2\sim 60.3\pm 2.4\%$ 범위로 높은 경향을 나타내었다.

이상의 결과를 요약해 보면 유기농 시설채소 재배지 토양은 토심은 깊어지고, 고상과 경 도(흙의 단단함), 용적밀도(토양 단위 용적당 질량)는 낮아졌으며, 공극률(토양속 공간함유 율)은 높아지는 등 유기농 시설재배지 토양의 물리성이 양호하였다.

[Submitted, November. 13, 2015; Revised, November. 27, 2015; Accepted, December. 1, 2015]

References

1. Bertolino A. V. F. A., Nelson F. Fernandes, Joao P. L. Miranda, Andrea P. Souza, Marcel R. S. Lopes, and Francesco Palmieri. 2010. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau. *Journal of Hydrology* 393: 94-104.
2. Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk Density in A. Klute, ed., *Methods of Soil*

- Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9 (2nd ed.) pp. 363-375.
3. Bruggen H. C. A. V., K. Sharma, E. Kaku, S. Karfopoulos, V. V. Zelenev, and W. J. Blok. 2015. Soil health indicators and Fusarium wilt suppression in organically and conventionally managed greenhouse soils. *Applied Soil Ecology* 86: 192-201.
 4. Bulluck III, L. R., M. Brosius, G. K. Evanylo, and J. B. Ristaino. 2002. Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms. *Applied Soil Ecology* 19: 147-160.
 5. Cooper, J. M., G. Butler, and C. Leifert. 2011. Life cycle analysis of greenhouse gas emissions from organic and conventional food production systems, with and without bio-energy options. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 58: 185-192.
 6. Crittenden, S. J., N. Poot, M. Heinen, D. J. M. V. Balen, and M. M. Pulleman. 2015. Soil physical quality in contrasting tillage systems in organic and conventional farming. *Soil & Tillage Research* 154: 136-144.
 7. FiBL and IFOAM. 2015. The World of Organic Agriculture Statistics and Emerging Trends 2015. Frick, Switzerland and Bonn, Germany, pp. 25-33.
 8. Gajić, B. 2013. Physical properties and organic matter of Fluvisols under forest, grassland, and 100 years of conventional tillage. *Geoderma* 200-201: 114-119.
 9. Gronle A., Guido Lux, Herwart Böhm, Knut Schmidtke, Melanie Wild, Markus Demmel, Robert Brandhuber, Klaus-Peter Wilbois, and Jürgen Heß. 2015. Effect of ploughing depth and mechanical soil loading on soil physical properties, weed infestation, yield performance and grain quality in sole and intercrops of pea and oat in organic farming. *Soil & Tillage Research* 148: 59-73.
 10. Herencia, J. F., P. A. Garcia-Galavis, and C. Maqueda. 2011. Long-Term Effect of Organic and Mineral Fertilization on Soil Physical Properties Under Greenhouse and Outdoor Management Practices. *Pedosphere* 21(4): 443-453.
 11. Hole, D. G., A. J. Perkins, J. D. Wilson, I. H. Alexander, P. V. Grice, and A. D. Evans. 2005. Does organic farming benefit biodiversity? *Biological Conservation* 122: 113-130.
 12. Larsen, E., J. Grossman, J. Edgell, G. Hoyt, D. Osmond, and S. Hu. 2014. Soil biological properties, soil losses and corn yield in long-term organic and conventional farming systems. *Soil & Tillage Research* 139: 37-45.
 13. Mas-Colell, A., M. Whinston, and J. Green, 1995. *Microeconomic Theory*. Oxford University Press, New York.
 14. Meier M. S., F. Stoessel, N. Jungbluth, R. Juraske, C. Schader, and M. Stolze. 2015.

- Environmental impacts of organic and conventional agricultural products e Are the differences captured by life cycle assessment? *J. Environ. Manag.* 149: 193-208.
15. Nair, A. and M. Ngouajio. 2012. Soil microbial biomass, functional microbial diversity, and nematode community structure as affected by cover crops and compost in an organic vegetable production system. *Applied Soil Ecology* 58: 45-55.
 16. Padel, S., H. Rocklinsberg, and O. Schmid. 2009. The implementation of organic principles and values in the European Regulation for organic food. *Food Policy* 34: 245-251.
 17. Prasad, R. 1996. Cropping systems and sustainability of agriculture. *Indian Farming* 46: 39-45.
 18. Sequeira C. H., S. A. Wills, C. A. Seybold, and L. T. West. 2014. Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma* 213: 64-73.
 19. Schafer, R. L., C. E. Johnson, A. J. Koolen, S. C. Gupta, and R. Horn. 1992. Future research needs in soil compaction. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 35: 1761-1770.
 20. Shipitalo, M. J. and R. Protz. 1987. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. *Can. J. Soil Sci.* 67: 445-456.
 21. Stanhill, G. 1990. The comparative productivity of organic agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 30: 1-26.
 22. Wang E., R. M. Cruse, Y. Zhao, and X. Chen. 2015. Quantifying soil physical condition based on soil solid, liquid and gaseous phases. *Soil & Tillage Research* 146: 4-9.
 23. Whalley, W. R., J. To, B. D. Kay, and A. P. Whitmore. 2007. Prediction of the penetrometer resistance of agricultural soils with models with few parameters. *Geoderma* 137: 370-377.
 24. Weida Gao, W. Richard Whalley, Zhengchao Tian, Ju Liu, and Tusheng Ren. 2016. A simple model to predict soil penetrometer resistance as a function of density, drying and depth in the field. *Soil & Tillage Research* 155: 190-198.