용기 크기와 충전밀도 차이에 따른 피트모스 혼합상토의 물리성 변화

박은영¹ · 최종명^{1*} · 이동훈²

¹충남대학교 원예학과, ²충북대학교 바이오시스템공학과

Changes in Soil Physical Properties of Peatmoss Containing Root Media as Influenced by Container Size and Packing Density

Eun Young Park¹, Jong Myung Choi^{1*}, and Dong Hoon Lee²

¹Department of Horticultural Science, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²Department of Biosystems Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

Abstract. The objective of this research was to secure the fundamental information in changes of soil physical properties as influenced by the compaction of root media during container filling. Three root media were formulated by blending peatmoss (PM) with expanded rice hull (PM + ERH, 8:2, v/v), carbonized rice hull (PM + CRH, 6:4) and ground and aged pine bark (PM + GAPB, 8:2). Based on the optimum bulk density, the amount of root media filled into 6.0, 7.5, 8.5, 10.5 and 12.5 cm were adjusted to 90, 100, 110, 120, and 130%, then the changes in total porosity (TP), container capacity (CC), and air-filled porosity (AFP) were measured. The TP decreased significantly as the packing amount of three root media were elevated in all sizes of container. The TP did not show significant differences among the root media in small sizes of containers, but showed significant differences when sizes of containers became larger. As packing amount of three root media were elevated, the CCs in all sizes of containers were decreased. The PM + CRH had the lowest CC among three root media in containers smaller than 8.5 cm, but had the highest CC in those larger than 10.5 cm. These results indicated that the decreases in CC were influenced by the sizes of containers as well as kinds of root media. The elevation of packing amount in three root media diminished significantly the AFP. The AFP in PM + GAPB medium was two times as high as those of PM + ERH or PM + CRH when equal packing densities were applied in all sizes of containers. As the container sizes became larger in three root media, the extents in decreasing of CC were distinct than those of AFP. Above results indicate that elevation in packing amount of three root media decreased significantly the TP, CC and AFP, but these were influenced differently by sizes of containers and kinds of root media. The results would be useful for expectation in the changes of physical properties in various sizes of containers filled with peatmoss based root media.

Additional key words: air-filled porosity, container capacity, total porosity

서 언

온실 또는 식물 공장에서 원예작물 재배를 위해 이용되는 혼합상토는 2-4 종류 물질의 조합을 통해 공극률, 기상률, 액상률 또는 가비중 등 토양물리성을 작물 재배에 적합하도록 조절하고, 상토를 용기에 충전한 후 작물을 파종하거나

정식한다. 보편적으로 상토의 보수성을 향상시키기 위하여는 피트모스 등 내부 미세공극(internal micropore)을 많이 보유한 물질을 구성재료로 혼합하고, 토양통기성을 향상시키기 위해서는 펄라이트 등 직경이 큰 입자들의 혼합 비율을 조절한다(Choi et al., 1999a, 1999b, 2000; Fonteno and Nelson, 1990).

*Corresponding author: choi1324@cnu.ac.kr

※ Received 14 February 2013; Revised 18 April 2013; Accepted 22 April 2013. This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ907050)”, Rural Development Administration, Republic of Korea.

© 2013 Korean Society for Horticultural Science

혼합되는 물질의 종류 및 입도 분포, 미세공극을 보유한 정도 등 상토를 구성하는 재료의 특성과 혼합비율이 혼합상토의 물리성에 큰 영향을 미치지만, 상토를 용기에 충전할 때의 충전 방법도 큰 영향을 미친다. Lee(2011)도 혼합상토를 플러그트레이에 충전하는 과정에서 충전압력 차이가 발생할 때 변화된 용기 내의 토양물리성이 파종 10주 후의 묘생장량에 뚜렷한 영향을 미쳤다고 보고한 바 있다.

상토를 용기에 충전하는 과정에서 충전되는 상토량과 토양 물리성에 차이가 발생하는 것은 상토재료로 많이 이용되는 피트모스가 쉽게 수축되는 물질이기 때문이다. 이를 반영하듯 피트모스는 약 2.5배로 압축시킨 상태에서 국내로 수입되며, 부피를 줄임으로써 선박 수송비를 절감하고 있다(Choi et al., 2009). 다른 물질과 혼합하여 상토로 조제된 후에도 쉽게 수축되므로 충전하는 사람에 따라 용기내부로 충전되는 상토량에서 차이가 발생하고 물리성이 변화된다(Hamrick, 2003; Styer and Koranski, 1997). 용기 내로 충전되는 상토의 양이 적을 경우 식물체를 지주하는 상토량이 적어 물리·화학적 완충력이 낮아지며, 너무 많을 경우 공극률과 기상률이 감소하여 토양통기성이 불량해지고, 결과적으로 작물 생장이 저조한 원인이 된다. Hamrick(2003)은 상토의 충전 압력이 높아 용기 안으로 충전되는 상토의 양이 많을 경우 토양통기성이 불량해지며 발아된 종자의 뿌리가 용기 최하단부까지 도달하는 시간이 토양 통기성이 양호한 상태 보다 48-cell 플러그 재배에서는 3-7일, 17cm의 화분 재배에서는 7-10일 늦어진다고 하였다.

이상의 내용을 고려하여 피트모스가 주 재료인 세 종류의 혼합상토를 조제하고 실험실에서 크기가 다른 작물 재배용 화분에 상토의 충전량을 인위적으로 변화시켰다. 이 후 변화된 물리성을 측정하여 상토 충전량 차이에 따른 물리성 변화에 관하여 기초자료를 확보하고자 본 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

혼합상토 및 용기의 크기

본 연구에서 이용된 혼합 상토는 ① 피트모스 + 팽연왕겨(6:4, v/v; peatmoss + expanded rice hull, PM + ERH로 지칭), ② 피트모스 + 혼탄(7:3; peatmoss + carbonized rice hull, PM + CRH), ③ 피트모스+분쇄된 부숙 수피(8:2; peatmoss + ground and aged pine bark, PM + GAPB) 등 3 종류를 선별하여 실험을 수행하였다..

실험을 위해 상부의 내경(internal diameter)이 6cm(높이 5.5cm, 용적 85mL), 7.5cm(높이 7.0cm, 용적 192mL), 8.5cm(높이 9.0cm, 용적 308mL), 10.5cm(높이 10.5cm, 용적 590mL),

그리고 12.5cm(높이 12.5cm, 용적 1,097mL)인 5종류의 플라스틱 용기를 수집하여 실험을 수행하였다.

충전밀도의 조절

3종류 혼합 상토에 토양습윤제인 Aquagro^G(Aquatrols Corporation of America, Paulsboro, NJ)를 1m³당 445g씩 첨가하고 작물 재배에 적합하도록 함수량을 50-65%(Hamrick, 2003)로 조절하였다. 다시 혼합상토를 각 용기에 충전하면서 서서히 증류수를 첨가해 상토를 충전하는 과정에서 인위적인 압력 조절없이 수분에 의해서만 상토가 침전되어 밀도를 유지할 수 있는 상태가 되도록 하였다. 충전되는 상토의 양을 점차 증가시키면서 각 화분의 최상부와 상토의 실린더가 일치하도록 상토의 양을 조절하였다. 이 상태에서 관수 후 30분간 배수시키고 부피의 변화가 발생하는지를 점검하였는데, 관수 시 상토가 팽창하여 용적이 늘어나지만 배수 후 실린더와 동일한 높이로 변하는 상태를 작물 재배를 위한 최적 용적밀도라고 판단하였다.

수분을 보유한 3종류의 상토는 중량을 측정하고, 105°C의 건조기에서 24시간을 건조시킨 후 다시 중량을 측정하여 습윤상태의 용적밀도(wet bulk density)와 건조상태의 용적밀도(dry bulk density)를 계산하였다(Nelson, 2003). 이 밀도를 기준으로 각 화분의 용적을 고려하여 중량 기준으로 90, 100, 110, 120 및 130%가 되도록 각각의 상토를 충전한 후 물리성을 측정하였다.

상토의 물리성 측정

공극률, 기상률 및 용기용수량을 측정하기 위해 각각의 화분에 Bilderback et al.(1982)의 방법에 의해 목표 용적밀도(target bulk density)가 되도록 세 종류 상토를 채워 넣었다. 공극률(total porosity), 용기용수량(container capacity) 및 기상률(air filled porosity)은 크기가 다른 화분에 각 상토를 5반복으로 하여 Karlovich and Fonteno(1986)의 방법으로 측정 후에 계산하였다.

통계분석

각 상토의 충전밀도 변화가 공극률, 기상률 및 액상률에 미치는 영향은 각 조사항목의 처리별 Duncan의 다중검정과 회귀분석을 하였다. 회귀분석은 다항회귀분석을 통해 얻어진 1-2차항 회귀선중 최적예측 회귀함수를 결정하기 위해 R square 값과 Incremental F 값이 큰 회귀식을 최적 회귀식으로 판단하였다. 통계분석은 CoStat 프로그램(Monterey, California)으로 수행하였다.

결과 및 고찰

직경 6cm인 화분에 PM + ERH, PM + CRH 및 PM + GAPB 상토의 충전량이 증가함에 따라 공극률이 현저하게 감소하였다(Fig. 1). PM + ERH의 충전량을 90%로 조절한 처리의 공극률이 약 80%였지만 상토 충전량이 증가함에 따라 직선적으로 공극률이 감소하였다(Fig. 1A). PM + CRH와 PM + ERH 혼합상토도 상토 충전량이 증가함에 따라 공극률이 직선적으로 감소하였다. PM + GAPB 혼합상토는 충전량을 90%로 조절한 처리가 약 90%의 공극률로 측정되었지만 130%로 충전량을 증가시킬 경우 약 45% 수준으로 낮아졌으며 상토 충전량 증가는 2차곡선회귀적으로 공극률이 감소하는 원인이 되었다.

직경 6cm 화분에서 상토의 충전량이 증가할수록 PM + ERH와 PM + GAPB 상토의 용기용수량이 2차회귀적으로 낮아졌다. 그러나 PM + CRH 혼합상토의 용기용수량은 90% 충전량에서 약 62%로 가장 높았고, 상토 충전량 증가와 함께 직선적으로 낮아져 130% 충전량에서 약 39%로 측정되었다(Fig. 1B). 상토 충전량이 증가할수록 세 종류 상토의 기상률은 직선적으로 감소하였다(Fig. 1C). PM + ERH 혼합상토는 90% 충전량에서 약 26%, 그리고 130% 충전량에서 약 6%로 기상률이 직선적으로 낮아졌으며, PM + CRH와 PM + GAPB 상토보다 더 심하게 낮아졌다.

직경 7.5cm의 화분에 충전량 변화가 토양 물리성에 미치는 영향에서 세 종류의 혼합상토 모두 상토 충전량이 증가함에 따라 직선적으로 공극률이 감소하였고, 0.1% 수준의 직선회귀가 성립하여 경향이 뚜렷함을 나타내고 있다(Fig. 2A). 상토 충전량 차이가 용기용수량 변화에 미치는 영향에서 PM + CRH는 상토 충전량에 따른 용기용수량이 90% 충전량에서 약 74%였지만 130% 충전량에서 약 54%로 용기용수량이 감소하여 2차곡선회귀적으로 감소하였다. 이러한 결과는 상토 충전량이 증가할수록 PM + ERH와 PM + GAPB의 용기용수량이 직선적으로 감소하고, 감소한 정도도 10% 이내였던 점을 고려할 때 PM + CRH 상토의 감소폭이 컸고, 팽연왕겨의 물질 특성에 기인한 결과라고 판단한다. 기상률도 PM + CRH는 상토 충전량이 증가함에 따라 2차곡선회귀적으로 낮아졌으며 직선적으로 낮아진 PM + GAPB 또는 PM + CRH와 차이를 보였다.

직경 8.5cm의 화분에서 PM + GAPB는 90% 충전량에서 공극률이 약 92%로 측정되었지만 130% 충전량에서는 약 65%로 2차곡선회귀적으로 낮아졌다(Fig. 3A). 상토 충전량이 많아질수록 세 종류 상토의 용기용수량이 2차곡선회귀적으로(PM + CRH와 PM + GAPB) 또는 직선적으로(PM +

Fig. 1. Changes in total porosity (A), container capacity (B) and air filled porosity (C) of peatmoss based root media as influenced by the various amounts of root media packed into the 6 cm pot (6.0 cm, 5.5 cm and 85 mL in internal diameter, height and volume, respectively). The 100 percent of root medium indicates that no volume was changed after subirrigation of distilled water followed by drainage for 30 minutes. The 90, 110, 120, and 130% indicate the decrease or increase in the amount of root media based on the weight during packing into the 6 cm pot (PM, peatmoss; ERH, expanded rice hull; CRH, carbonized rice hull; GAPB, ground and aged pine bark).

Fig. 2. Changes in total porosity (A), container capacity (B) and air filled porosity (C) of peatmoss based root media as influenced by the various amounts of root media packed into the 7.5 cm pot (7.5 cm, 7.0 cm and 192 mL in internal diameter, height and volume, respectively). The 100 percent of root medium indicates that no volume was changed after subirrigation of distilled water followed by drainage for 30 minutes. The 90, 110, 120, and 130% indicate the decrease or increase in the amount of root media based on the weight during packing into the 7.5 cm pot (PM, peatmoss; ERH, expanded rice hull; CRH, carbonized rice hull; GAPB, ground and aged pine bark).

Fig. 3. Changes in total porosity (A), container capacity (B) and air filled porosity (C) of peatmoss based root media as influenced by the various amounts of root media packed into the 8.5 cm pot (8.5 cm, 9.0 cm and 308 mL in internal diameter, height and volume, respectively). The 100 percent of root medium indicates that no volume was changed after subirrigation of distilled water followed by drainage for 30 minutes. The 90, 110, 120, and 130% indicate the decrease or increase in the amount of root media based on the weight during packing into the 8.5 cm pot (PM, peatmoss; ERH, expanded rice hull; CRH, carbonized rice hull; GAPB, ground and aged pine bark).

ERH)으로 감소하였으며, PM + CRH의 결정계수($R^2 = 0.99$)가 가장 높았다. 기상물 또한 세 종류 상토의 충전량이 증가함에 따라 직선으로 감소하였다. 그러나 PM + GAPB 상토가 다른 두 종류의 상토보다 기상물이 약 1.7배 정도 높았다.

직경 10.5cm 화분에 PM + GAPB 상토의 충전량을 90%로 조절한 처리가 약 97%의 높은 공극률로 측정되었지만 충전량을 130%로 증가시킬 경우 약 79% 수준으로 낮아졌으며 상토 충전량 증가가 공극률이 직선적으로 감소하는 원인이 되었다(Fig. 4A). 용기용수량은 PM + CRH의 경우 충전량이 90 및 100%로 조절된 처리에서 약 80%였고 기상물은 약 14-15%였지만 상토충전량이 증가함에 따라 용기용수량이 완만하게 감소한 데 비해 기상물은 직선적으로 급격히 감소하였다. 보편적인 원예작물 재배용 혼합상토는 공극률 85-95%, 용기용수량 70-80%, 그리고 기상물 10-20%로 보고되고 있다(Argo, 1998; Bunt, 1988; Nelson, 2003). PM + CRH 혼합상토는 모든 충전량에서 용기용수량 및 기상물이 추천된 범위에 포함되었지만 PM + ERH와 PM + GAPB는 충전밀도가 높아짐에 따라 용기용수량이 과도하게 낮아진다고 판단하였다.

직경 12.5cm 화분에 PM + GAPB(8:2)의 충전량을 90%로 조절한 처리의 공극률이 약 82%였지만 상토 충전량이 증가함에 따라 직선적으로 감소하였다(Fig. 5). PM + ERH 상토의 용기용수량은 충전량 90%에서 약 55%였고 충전량 130%에서 약 37%로 충전량이 증가함에 따라 직선적으로 감소하는 경향을 보였다. PM + ERH와 PM + CRH는 충전량을 90%로 조절한 처리에 비해 130%로 조절한 처리에서 약 60% 수준으로 기상물이 감소하였으며, 충전량이 증가함에 따라 기상물이 직선적으로 감소하는 경향을 보였다.

Verdonck and Penninck(1986)은 혼합상토 내의 공극을 직경이 30-300 μ m의 크기로 입자간에 형성된 대공극과 10-30 μ m로 입자 내부에 존재하는 미세공극으로 구분하였고, 대공극은 가스확산에, 미세공극은 보수성 증진에 중요한 역할을 한다고 보고하였다. Styer and Koranski(1997)는 혼합상토를 조제하는 과정에서 공극률을 높이기 위해 거친 입자의 혼합비율이 높아질수록 전체 공극 중 대공극의 비율이 높아지지만 동일한 용적의 용기 안으로 충전되는 상토량이 많아지면 입자 사이에 형성된 대공극이 뚜렷하게 감소하여 미세공극으로 변한다고 하였다. 또한 수축이 잘 되는 물질의 경우 공극률의 감소 정도는 적지만 공극의 대부분이 직경이 작은 미세공극으로 변한다고 하였다. 본 연구의 재료인 혼탄은 팽연왕겨나 분쇄된 부숙수피에 비해 직경이 컸지만 물질의 특성상 수축이 잘 되지 않으며, 충전량이 증가하여도 대공극이 미세공극으로 변하지 않고 공극률 자체가 감소한

Fig. 4. Changes in total porosity (A), container capacity (B) and air filled porosity (C) of peatmoss based root media as influenced by the various amounts of root media packed into the 10.5 cm pot (10.5 cm, 10.5 cm and 590 mL in internal diameter, height and volume, respectively). The 100 percent of root media indicates that no volume was changed after subirrigation of distilled water followed by drainage for 30 minutes. The 90, 110, 120, and 130% indicate the decrease or increase in the amount of root media based on the weight during packing into the 10.5 cm pot (PM, peatmoss; ERH, expanded rice hull; CRH, carbonized rice hull; GAPB, ground and aged pine bark).

Fig. 5. Changes in total porosity (A), container capacity (B) and air filled porosity (C) of peatmoss based root media as influenced by the various amounts of root media packed into the 12.5 cm pot (12.5 cm, 12.5 cm and 1,097 mL in internal diameter, height and volume, respectively). The 100 percent of root medium indicates that no volume was changed after subirrigation of distilled water followed by drainage for 30 minutes. The 90, 110, 120, and 130% indicate the decrease or increase in the amount of root media based on the weight during packing into the 12.5 cm pot (PM, peatmoss; ERH, expanded rice hull; CRH, carbonized rice hull; GAPB, ground and aged pine bark).

결과로 나타났다고 판단한다.

본 연구에서 용기 내로 충전된 세 종류 상토의 양이 많아 질수록 공극률, 용기용수량 및 기상률이 뚜렷하게 감소하였다. 공극률이 감소한 원인은 앞서 설명한 바와 같다. 용기용수량 및 기상률이 감소한 것도 전체 공극률이 감소함으로써 물과 공기가 차지하는 공극의 비율이 감소한 것에서 원인을 찾을 수 있다. 크기가 다른 용기에 충전량이 많아져도 세 종류 상토의 공극률은 유사한 경향을 보이며 감소하였지만, 상토의 충전량이 많아지면 용기가 커질수록 작은 용기 보다 기상률 감소가 적고 액상률 감소의 정도가 커지는 경향이 있었다. 이는 용기의 크기가 커질수록 용기의 바닥으로부터 최상부까지 높이가 높아지고 중력이 강하게 작용하며, 이로 인해 용기의 하단부에 존재하는 배수공을 통해 배출되는 물의 양이 많아진 것에서 원인을 찾을 수 있다. Nelson(2003), Styer and Koranski(1997) 그리고 Wallach(2008)도 유사한 보고를 하여 본 연구결과를 뒷받침하고 있다.

또한 본 연구에서 직경이 6cm 또는 7.5cm인 화분에서는 충전되는 상토의 양이 120%로 높아질 경우 기상률이 10% 미만으로 측정되었지만 직경 8.5cm 또는 10.5cm인 화분에서는 충전량이 130%로 높아질 때 기상률이 10% 미만으로 측정되었다. 보편적인 원예용 상토는 공극률, 용기용수량, 기상률이 각각 85-95%, 70-80%, 그리고 10-20%로 보고되고 있으며(Argo, 1998; Bunt, 1988; Nelson, 2003), 용기의 크기가 작을 경우 충전량을 110% 이내로, 용기의 직경이 10cm 이상일 경우 120% 또는 130%의 충전량도 작물 재배를 위해 허용 가능하다고 판단하였다.

초 록

수축성이 강한 원예용 상토를 용기에 충전할 때 충전량 변화에 따른 물리성 변화를 구명하기 위해서 본 연구를 수행하였다. 피트모스 + 팽연왕겨(8:2, v/v; PM + ERH), 피트모스 + 혼탄(6:4; PM + CRH) 및 피트모스 + 분쇄부숙수피(8:2; PM + GRPB)의 세 종류 상토를 혼합 조제하였다. 작물 재배를 위한 최적 가비중을 기초로 직경이 6.0, 7.5, 8.5, 10.5 및 12.5cm의 용기에 90, 100, 110, 120 및 130%가 되도록 상토 충전량을 조절한 후 공극률, 용기용수량 및 기상률의 변화를 측정하였다. 모든 크기의 화분에 세 종류 혼합 상토의 충전량이 많아질수록 뚜렷하게 공극률이 감소하였다. 그러나 용기의 크기가 작아질수록 세 종류 상토의 공극률이 유사한 경향을 보이며 감소하고 각 상토별 차이도 크지 않았지만 용기의 크기가 커질수록 공극률 감소의 상토별 차이가 커지는 경향이 있었다. 상토 충전량이 많아질수록 용기

용수량도 뚜렷하게 낮아졌다. 혼탄이 포함된 PM + CRH 상토는 직경 8.5cm 이하의 작은 용기에서 세 종류 상토중 용기용수량이 가장 낮았지만 직경 10.5cm 이상으로 용기가 커질수록 용기용수량이 가장 높았으며 화분의 크기 및 상토 종류에 따라 다른 경향을 보이며 물리성이 변함을 알 수 있었다. 모든 규격의 화분에서 상토 충전량 증가는 기상물이 뚜렷하게 감소하는 원인이 되었다. 그러나 PM + GRPB가 혼합된 상토가 팽연왕겨나 혼탄이 포함된 상토 보다 모든 충전밀도에서 기상물이 2배 이상 높았다. 또한 상토 충전량이 많아져도 큰 화분에서는 기상물의 감소한 정도가 크지 않았지만 액상물의 감소한 정도가 컸다. 이상의 연구 결과는 혼합상토를 이용한 작물 재배에서 상토의 충전량이 증가할 경우 공극률, 기상물 및 액상물이 감소하지만 이는 용기의 크기 및 상토 종류에 따라 감소 정도가 달라질 수 있음을 나타낸다. 또한 본 연구 결과는 상토를 이용한 용기재배에서 충전량 차이에 따른 물리성 변화를 예측하기 위한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

추가 주요어 : 기상물, 용기용수량, 공극률

인용문헌

- Argo, W.R. 1998. Root medium physical properties. HortTechnology 8:481-485.
- Bilderback, T.E., W.C. Fonteno, and D.R. Johnson. 1982. Physical properties of media composed of peanut hulls, pine bark, and peatmoss and their effects on azalea growth. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 107:522-525.
- Bunt, A.C. 1988. Media and mixes for container grown plants. Unwin Hyman, London.
- Choi, J.M., H.J. Chung, and J.S. Choi. 2000. Physico-chemical properties of organic and inorganic materials used as container media. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 18:529-535.
- Choi, J.M., J.H. Chung, and J.S. Choi. 1999a. Physical properties of pine bark affected by peeling method and improving moisture retention capacity. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 40:363-367.
- Choi, J.M., H.J. Chung, B.G. Seo, and C.Y. Song. 1999b. Improved physical properties in rice-hull, saw dust and wood chip by milling and blending of recycled rockwool. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 40:755-760.
- Choi, J.M., I.Y. Kim, and B.K. Kim. 2009. Root substrates. Hackyesa, Daejeon, Korea.
- Fonteno, W.C. and P.V. Nelson. 1990. Physical properties of and plant responses to rockwool-amended media. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 115:375-381.
- Hamrick, D. 2003. Ball red book: Crop production. 17th ed. Ball Publishing, Batavia, IL.
- Karlovich, P.T. and W.C. Fonteno. 1986. Effect of soil moisture tension and soil water content on the growth of chrysanthemum in 3 container media. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 111:191-195.
- Lee, J.M. 2011. Factors affecting the quality of grafted vegetable transplants. Intl. Symp. Vegetable Grafting. October 3-5, 2011, Viterbo, Italy. p. 13.
- Nelson, P.V. 2003. Greenhouse operation and management. 6th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Styer, R.C. and D.S. Koranski. 1997. Plug & transplant production: A growers guide. Ball Publishing, Batavia, IL.
- Verdonck, O. and R. Penninck. 1986. Air content in horticultural substrates. Acta Hort. 178:101-106.
- Wallach, R. 2008. Physical characteristics of soilless media, p. 41-116. In: M. Raviv and J.H. Leith (eds.). Soilless culture: Theory and practice. Elsevier, San Diego, CA.