

완전제어형 식물공장에서 콜라비의 생육과 품질에 대한 적정 재식밀도

운찬일¹ · 조영열^{1,2*}

¹제주대학교 원예환경전공

²제주대학교 아열대농업생명과학연구소, 친환경연구소

Optimal Planting Density on Growth and Quality Characteristics of Kohlrabi in a Closed-type Plant Factory System

Chan-II Uoon¹ and Young-Yeol Cho^{1,2*}

¹Major of Horticultural Science, College of Applied Life Sciences, Jeju National University, Jeju 63243 Korea

²Research Institute for Subtropical Agriculture and Animal Biotechnology, SARI, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

Abstract. The crops recommended for the plant factory system are diverse. The importance of planting density in the plant factory is being recognized. The objective of this study was to determine the optimal planting density for growth and quality of kohlrabi in a closed-type plant factory system. The kohlrabi was grown under fluorescent lamps and nutrient film technique system. The growth and quality of kohlrabi were investigated under four different planting densities (22 plants/m²(15 × 30 cm), 27 plants/m²(15 × 25cm), and 33 plants/m²(15 × 20cm)). There were no significant interactions between Shoot fresh and dry weights per plant or bulb stem fresh and dry weights per plant and planting density. Shoot fresh and dry weight per area or bulb stem fresh and dry weight per area were the highest at 33 plants/m². There were no significant interactions between plant height, leaf area, photosynthetic rate, hardness, and chlorophyll content and planting density. Significant differences in Bulb stem height and diameter, and brix were observed. Bulb stem height and diameter and brix of kohlrabi were the highest at 22 plants/m². Based on our results, we conclude that the optimal planting density is 33 plants/m² for growth of kohlrabi, however, the optimal planting density is 22 plants/m² for quality of kohlrabi in a closed-type plant factory system.

Additional key words : *Brassica oleracea*, bulb stem diameter, fluorescent lamps, shoot dry weight, shoot fresh weight

서 론

콜라비(*Brassica oleracea* var. *gongylodes*, Kohlrabi)는 배추과에 속하는 2년생 초본식물로 비대줄기를 식용 대상으로 하는 채소로(Kim 등, 2014). 최근 웰빙 채소로 수요가 계속해서 증가하고 있는 추세이다 (Park 등, 2014). 제주도에서는 월동 무나 당근과 같이 농가소득에 기여도가 높은 작물 중 하나이다(Uoon 등, 2017).

식물공장(Plant Factory)이란 작물의 생육에 필요한 최적 환경 조건으로 관리하여, 작물을 계획적으로 연속생산, 고속생산 및 대량생산이 가능한 시스템을 말한다(Cha 등, 2012). 식물공장에서는 재배환경을 최적화할 수 있어 생산성의 향상과 고품질화가 가능하다(Takatsuji, 2008). 식물공장 종류 중 하나인 인공광만을 이용한 완전제어형

식물공장은 외부환경의 영향을 받지 않고 작물의 재배가 가능하기 때문에 사막이나 극지방, 및 우주공간과 같은 식물의 생육이 불가능한 지역에서도 입지여건과 상관없이 작물의 재배가 가능하다(Choi 등, 2013). 대부분의 연구는 식물공장에 적용할 수 있는 몇 가지 엽채류의 생육, 수량 및 품질 향상과 관련한 연구 등이 보고되고 있다(Cho 등, 1998). 이처럼 식물공장에 적합한 작물의 종류가 매우 제한적이며 부가가치가 높은 고소득 작물에 대한 재배 방법에 대한 연구가 미흡한 실정이기 때문에 이에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

작물의 수량성 요소와 관련하여 일정한 범위의 재식밀도 증가는 작물의 광합성 지수 및 광 이용효율을 높여 작물의 수율 향상을 위한 재식밀도 효과를 극대화 할 수 있다고 하였는데(Dieoenbrock, 2000), 식물공장에서 재배하는 작물에 대한 재식밀도는 경제성과 관련하여 매우 중요한 요소이기 때문에 식물공장의 생산성 측면에서 단위면적당 생산량을 높이기 위해서는 재배작물의 종류나 품종에 적합한 재식밀도에 대한 연구가 필요하다.

*Corresponding author: yycho@jejunu.ac.kr

Received January 9, 2019; Revised February 8, 2019;

Accepted February 25, 2019

따라서, 본 연구는 완전제어형 식물공장에서 콜라비의 생육과 품질에 영향을 주는 적정 재식밀도를 구명하고자 수행되었다.

재료 및 방법

공시 작물은 적콜라비 품종인 ‘콜리브리’(Kolibri, Bejo Zaden Co., Ltd., Netherlands)를 사용하였다. 우레탄 스폰지(2.5 × 2.5 × 2.5cm)에 파종하여 본엽이 3매 전개될 때 식물공장에 설치된 재배베드에 정식하였다. 실험은 제주대학교에 설치된 완전제어형 식물공장(500 × 700 × 300cm)에서 박막(NFT) 수경재배 방식(60 × 240 × 200cm)을 적용하여 실시하였다. 실험에 사용된 인공광원은 5파장 형광등(55W, Phillips Co. Ltd., the Netherlands)를 사용하였고, 높이 40cm에서 광도를 160~180 μmol·m⁻²·s⁻¹로 고정하였으며(Fig. 1), 일장은 12/12시간(낮/밤)으로 조절하였다. 광도 측정은 광 센서(LI-190, Li-cor, Lincoln, Nebrasks, USA)를 이용하여 측정하였다.

온도는 온도 센서(HMP45AC, Campbell Scientific, Logan UT, USA)를 이용하여 에어컨(HP-N239L, Samsung Electronics Co., Ltd., Korea)과 히터(HV-7800, Hanvit System Co., Ltd., Korea)를 이용하여 실내온도는 14.2-23.6(평균 21.0)°C로 조절하였으며, 상대습도는 가습기(NH-5, Hwajeun Eng., Korea)와 제습기(SG-M220S-4, Shinan Green-Tech Co., Ltd., Korea)를 이용하여 39.7-69.7(평균 56.8)%로 조절하였다. 이산화탄소는 이산화탄소 센서(GMP222, Vaisala, Helsinki, Finland)를 이용하여

지하공기를 이용하여 494-721(평균 556) μmol·mol⁻¹로 조절하였다. 콜라비 배양액은 NO₃-N 16.0, NH₄-N 1.0, P 1.0, K 10.0, Ca 3.0, Mg 1.0, SO₄-S 1.0 mM·L⁻¹였다(Uoon 등, 2017). 배양액의 EC농도는 2.0-2.2 dS·m⁻¹로 처리구별로 처리하였으며, pH는 5.5-6.5로 매일 조절해주었다.

재식밀도처리는 열간의 거리는 15cm로 고정된 후, 열내의 거리를 20, 25, 30cm로 3처리하였다. 재식밀도는 20, 25, 30cm가 각각 33, 27와 22 plants/m²였다. 생육조사 항목은 생체중, 건물중, 초장, 경경, 엽수, 엽면적, 비대줄기의 생체중과 건물중, 엽록소함량, 광합성, 당도 및 경도를 조사하였다. 건물중은 드라이오븐(VS-1202D2, Vision Scientific, Korea)에 분쇄한 시료를 넣어 70°C에서 72시간 건조하였다. 또한 광합성속도를 알아보기 위해서 광합성측정기(LI-6400, Li-Cor, Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하였다. 엽록소함량은 엽록소측정기(Minolta Co., LTD. Japan)를 이용하였고, 광도와 경도는 휴대용 당도측정계(PAL-3, ATAGO, Japan)와 휴대용 경도측정계 5mmØ plunger (FHM-5, Takemura Co., Japan)를 이용하여 측정하였다.

실험구는 완전임의배치법을 이용하였고, 처리별로 3반복으로 실시하였다. 통계분석은 SAS(Statistical Analysis System, ver9.4, Cary, NC, USA) 프로그램을 이용하였으며, DMRT(Duncan’s multiple range test)로 유의성을 검정하였다. 그래프작성을 위하여 SigmaPlot (ver. 10.0, Systat Software Inc., Chicago, IL, USA)을 사용하였다.

결과 및 고찰

식물체당 지상부 생체중과 건물중의 변화는 정식일로부터 4주 동안은 완만한 곡선을 보였으며, 정식 후 35일경부터 식물체당 지상부 생체중과 건물중의 변화량이 빠르게 증가하는 양상을 나타냈다(Fig. 2). 정식 후 51일째 식물체당 지상부 생체중에서 재식밀도간 유의적인 차이를 보였지만(Fig. 2A), 식물체당 지상부 건물중에는 유의적인 차이를 보이지 않았다(Fig. 2B). 정식 후 66일째에 식물체당 지상부 생체중과 건물중은 유의적인 차이를 보이지 않았다. 식물체당 건물중은 시그모이드 형태인 S자형 형태를 보였다(Fig. 2B).

생육단계별 단위면적당 지상부 생체중과 건물중 변화량은 정식 후 35일째와 66일째 단위면적당 지상부 생체중에서 재식밀도간 유의적인 차이를 보였다(Fig. 3A). 그리고 정식 후 35일째, 51일째와 66일째 단위면적당 지상부 건물중에서 재식밀도간 유의적인 차이를 보였다(Fig. 3B).

단위면적당 지상부 생체중과 건물중은 재식밀도가 높

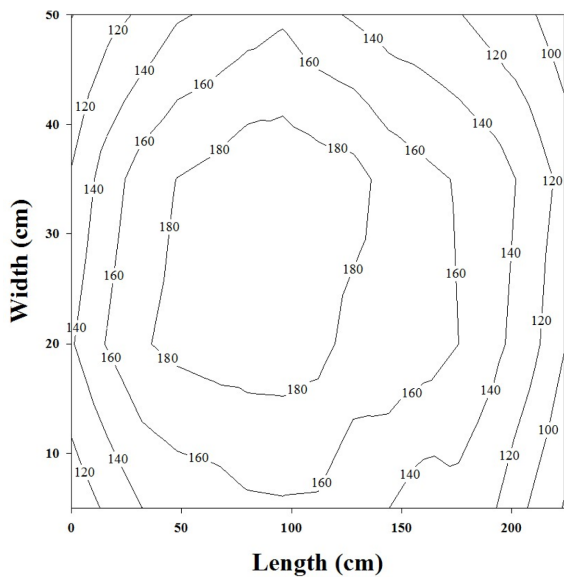


Fig. 1. Distribution of light intensity under 5-band radiation type fluorescent lamps.

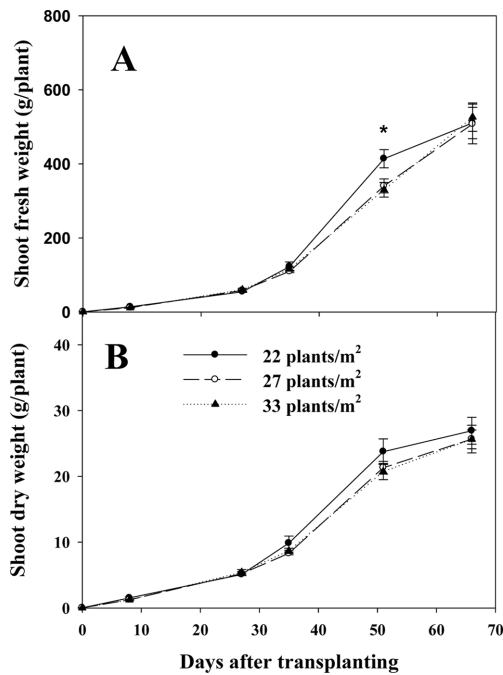


Fig. 2. Shoot fresh (A) and dry weights (B) per plant of kohlrabi under 66 days after transplanting different planting densities. Vertical bars represent the standard error. The replication plants of 8, 27, 35, 51, and 66 days after transplanting were 4, 4, 5, 6, and 10, respectively.

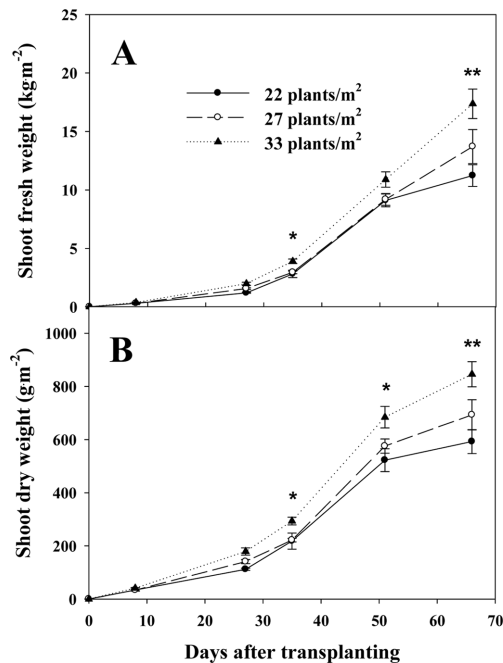


Fig. 3. Shoot fresh (A) and dry weights (B) per area of kohlrabi under 65 days after transplanting different planting densities. Vertical bars represent the standard error. The replication plants of 8, 27, 35, 51, and 66 days after transplanting were 4, 4, 5, 6, and 10, respectively.

은 처리구에서 높게 나타났다. 본 연구에서는 식물체당 생산량에 있어서 재식밀도가 높을수록 유의적인 차이를 보이지 않지만, 단위면적당 생산량에 있어서는 재식밀도가 높을수록 수량도 증가한다는 결과를 얻었다. NeSmith(1993)와 Reiners와 Riggs(1999)의 연구에서는 재식밀도가 높으면 높을수록 적정 재식밀도에 이르기까지 수량이 증가한다고 보고하고 있으나, 식물공장에서 재배한 상추, 치커리, 청경채 등의 쌈채소의 경우 재식밀도가 높은 처리구에서 가장 높은 수량을 나타냈다고 한 Cha 등(2012)의 연구 결과나 밀식 재배한 돌나물에서 재식밀도에 따른 단위면적당 생산성은 밀식할수록 높아진다고 한 Lee 등(2010)의 결과와 비슷한 결과를 얻었다. 그러나 NeSmith(1993)와 Reiners와 Riggs(1999)의 연구에서는 재식밀도가 높으면 높을수록 적정 재식밀도에 이르기까지 수량이 증가한다고 보고하고 있다. 본 연구에서도 더 높은 재식밀도에 대한 실험을 수행했어야 하지만, 벌브의 지름이 10cm 이상 생육하기 때문에, 더 높은 재식밀도는 어렵다고 판단되었다.

줄기의 비대 생육 변화를 보면, 정식 후 27일부터 벌브의 비대가 급격히 진행되는 것을 알 수 있었다(Fig. 4). 정식 후 51일째 비대 줄기(벌브)에서 재식밀도간 유의적인 차이를 보였지만, 정식 후 66일째에는 유의적인 차이를 보이지 않았다 (Figs. 4A and 5A).

그러나, 단위면적당 벌브의 지상부 생체중과 건물중은 유의적인 차이를 보였다(Fig. 5B). 재식밀도가 높은 처리구 순으로 높은 생육량을 나타냈다. 벌브가 전체 지상부 생체중에 차지하는 비율은 증가하였으며, 정식 후 66일째 재식밀도 22, 27과 33 plants/m²에서 각각 전체 지상부 생체중의 76, 77, 78%를 차지하였다. 식물공장에서의 생육속도는 노지보다 빠르기 때문에, 벌브가 차지하는

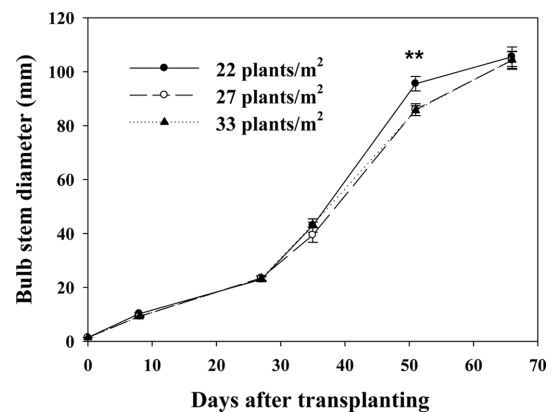


Fig. 4. Bulb stem diameter of kohlrabi under 66 days after transplanting different planting densities. Vertical bars represent the standard error. The replication plants of 8, 27, 35, 51, and 66 days after transplanting were 4, 4, 5, 6, and 10, respectively.

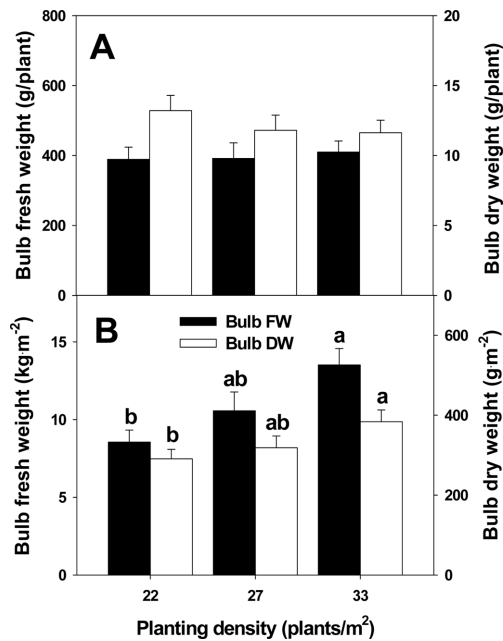


Fig. 5. Bulb fresh and dry weights per plant (A) and Bulb fresh and dry weights per area (B) of kohlrabi under 66 days after transplanting different planting densities. Vertical bars represent the standard error (n= 10).

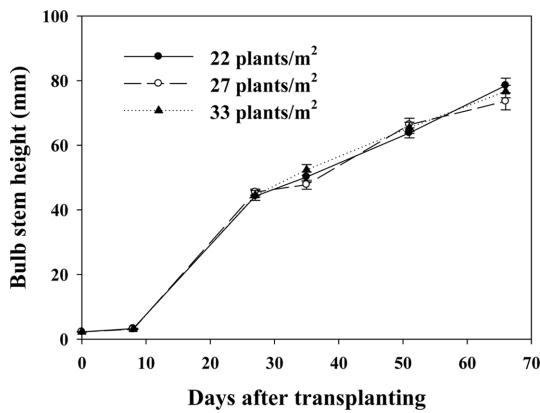


Fig. 6. Bulb stem height of kohlrabi under 66 days after transplanting different planting densities. Vertical bars represent the standard error. The replication plants of 8, 27, 35, 51, and 66 days after transplanting were 4, 4, 5, 6, and 10, respectively.

비율은 생육이 계속될수록 노지에 비해 증가할 것으로 본다.

다단식 형태의 식물공장에서는 초장의 변화가 중요한 부분을 차지한다. 콜라비의 초장 변화를 보면, 재식밀도 외는 유의적인 차이를 보이지 않았다 (Fig. 6). 초장의 변화는 정식 후 8일부터 급격히 변화하기 시작하지만, 정식 후 27일부터는 완만한 변화를 보였다.

엽면적의 변화는 정식 후부터 계속해서 증가하다가 정

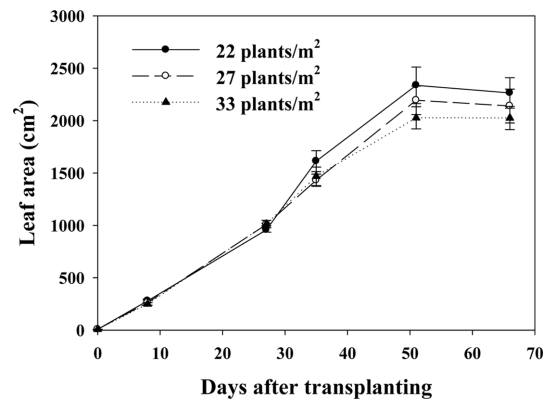


Fig. 7. Leaf area of kohlrabi under 66 days after transplanting different planting densities. Vertical bars represent the standard error. The replication plants of 8, 27, 35, 51, and 66 days after transplanting were 4, 4, 5, 6, and 10, respectively.

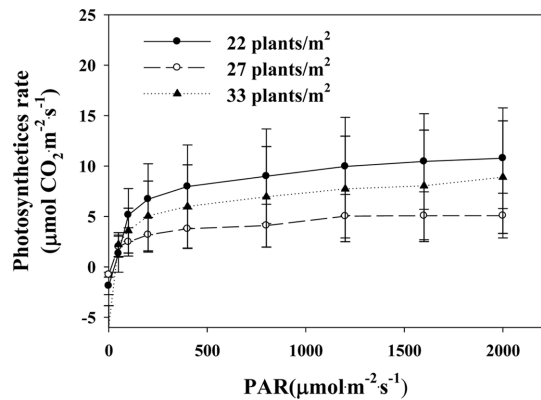


Fig. 8. Photosynthetic rate of kohlrabi at 66 days after transplanting different planting densities. CO₂ concentration, air temperature and relative humidity of measuring conditions were 400µmol·mol⁻¹, 20°C and 54%, respectively. Vertical bars represent the standard error (n=3).

식 후 51일부터 감소하는 경향을 보였다(Fig. 7). 재식밀도와 엽면적간의 유의적인 차이는 보이지 않았다. 생육 단계가 진전되면서 엽면적이 증가하다가 생육 후반기에 들어서면서 감소하는 경향을 나타내었는데 일반적으로 작물이 생육하는 기간 동안의 엽면적 증가는 시그모이드 형태의 곡선을 나타낸다고 한 Motulsky와 Christopoulos (2003) 연구결과와 유사한 성장곡선을 나타내었다. 정식 후 51일부터 엽면적은 감소하기 시작하였는데, 이것은 벌브 생체중 변화와 관련이 있다고 판단되었다. 즉, 엽면적 변화가 식물공장에서 콜라비를 수확하기 위한 시기를 결정하는데 중요한 요인이라 생각되었다.

광합성 측정 결과 콜라비의 광합성은 재식밀도 처리에 따른 유의적인 차이를 보이지 않았다(Fig. 8). 광량이 증가 하면서 광합성속도가 PAR 400µmol·m⁻²·s⁻¹까지 빠르

Table 1. Quality characteristics of kohlrabi under different planting densities in a closed-type plant factory system.

Planting density (plants/m ²)	Bulb stem height (mm)	Bulb stem diameter (mm)	Hardness (kg/5mmØ)	Soluble solids (°Brix)	Chlorophyll content (SPAD)
22	80.6 a ^z	95.6 a ^z	3.78	5.57 a	61.8
27	71.1 b	91.6 ab	3.74	5.43 a	58.0
33	75.9 ab	85.3 b	3.53	5.03 b	57.2

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p < 0.05$.

게 증가하다가 이 후 높아진 광량에 비해서 광합성이 천천히 증가하는 양상을 나타내었는데, 차광 재배한 인삼에서의 광합성과 유사한 결과를 나타내었다(Oh 등, 2010). 본 연구 결과 식물공장에서 콜라비 재배에 필요한 적정 광도는 PAR 200~400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이며, 재식밀도는 광합성에 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.

재식밀도에 따른 품질 특성을 살펴보면, 재식밀도와 경도와 엽록소 함량간에는 유의적인 차이가 없었다 (Table 1). 재식밀도와 벌브 높이와 지름 및 당도간에는 유의적인 차이를 보였다. 재식밀도가 낮은 22plants/m² 처리구에서 가장 높은 벌브 높이와 지름을 보였으며, 당도 또한 높았다. 낮은 당도는 노지에서 월동작물로 재배하는 콜라비에 비하여 낮은 수준이지만, 여름 수확용 콜라비와는 비슷한 수준인 것으로 나타났다(자료 미제시).

과형을 결정짓는 벌브 높이와 지름은 비대 줄기의 과형지수에 영향을 미치는 요소로 콜라비의 외관품질과 관련하여 중요한 요소로 작용한다. 그러나 콜라비의 외관과 관련하여 상품성을 평가하는 기준이 없는 실정이다. 노지에서 재배되고 있는 콜라비의 경우 벌브 높이가 짧고 지름이 넓은 모양의 콜라비가 유통과정에서 소비자의 선호도가 높은 과형으로 인정되고 있으나 이에 대한 명확한 기준은 없는 실정이다. 이러한 이유 때문에, 식물공장에서 생산되는 콜라비의 상품성에 대한 보다 명확한 기준이 확립할 필요가 있다고 본다.

이상의 결과를 바탕으로 결론을 내리면, 경제성을 고려한 생육적인 측면에서는 단위면적당 생산량이 많은 33 plants/m² (15×20cm)의 재식밀도가 적정하였으나, 당도와 같은 품질적인 측면에서는 재식밀도 22plants/m² (15×30cm)의 재식밀도가 적정하였다.

초 록

식물공장에 재배 가능한 작물은 매우 다양할 것으로 본다. 식물공장에서 재식밀도에 대한 중요성이 인식되고 있다. 본 연구는 완전제어형 식물공장에서 콜라비의 재배에 적합한 재식밀도를 구명하기 위하여 수행되었다. 식물공장 형태는 형광등을 이용한 완전제어형태로, 박막수경재배를 이용하여 재배하였다. 재식밀도는 22plants/m²(15×30cm), 27

plants/m²(15×25cm), 그리고 33 plants/m²(15×20cm)로 처리하였다. 식물체당 지상부 생체중과 건물중 또는 식물체당 벌브의 지상부 생체중과 건물중에는 재식밀도간 유의적인 차이를 보이지 않았다. 단위면적당 지상부 생체중과 건물중 또는 단위면적당 벌브의 지상부 생체중과 건물중에는 재식밀도가 높은 처리구(33plants/m²)에서 높게 나타났다. 재식밀도와 초장, 엽면적, 광합성, 경도 및 엽록소간에는 유의적인 차이를 보이지 않았다. 재식밀도와 벌브 높이와 지름 및 당도간에는 유의적인 차이를 보였다. 재식밀도가 낮은 22plants/m² 처리구에서 가장 높은 벌브 높이와 지름을 보였으며, 당도 또한 높았다. 이상의 결과를 바탕으로 결론을 내리면, 경제성을 고려한 생육적인 측면에서는 단위면적당 생산량이 많은 재식밀도 33plants/m² (15×20cm)가 적정하였으나, 당도와 같은 품질적인 측면에서는 재식밀도 22plants/m² (15×30cm)가 적정하였다.

추가 주제어: *Brassica oleracea*, 벌브 지름, 형광등, 지상부 건물중, 지상부 생체중

사 사

본 연구는 농림축산식품부 첨단생산기술개발사업(과제번호:115104033CG000)에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

Cha, M.K., S.H. Lee, and Y.Y. Cho. 2012. Selection of leaf vegetables and set-up of planting density and light intensity in the plant factory. *J. Asian Agric. Biotechnol.* 28:17-23(in Korean).

Cho, Y.Y., D.W. Hahn, and Y.B. Lee. 1998. Effect of artificial light sources on growth of crisphead lettuce in plant factory. *J. Bio. Fac. Env.* 7:35-42(in Korean).

Choi, C.S., J.G. Lee., Y.A. Jang, S.G. Lee, S.S. Oh, H.J. Lee, and Y.C. Um. 2013. Effect of artificial light sources on growth and quality characteristics of leaf lettuce in closed plant factory system. *J. Agric. Life Sci.* 47(6):23-32(in Korean).

Diepenbrock, W. 2000. Yield analysis of winter oilseed rape

- (*Brassica napus* L.) a review. *Field Crops Res.* 67:35-49.
- Kim, D.B., J.W. Oh, J.S. Lee, I.J. Park, J.H. Cho, and O.H. Lee. 2014. Antioxidant activities of green and purple kohlrabi juices. *Korean J. Food Sci. Technol.* 46:601-608(in Korean).
- Lee, S.Y., H.J. Kim, and J.H. Bae. 2010. Effect of planting density on growth and quality in hydroponics of *Sedum sarmentosum*. *J. Korean Soc. Hortic. Sci.* 28:580-584(in Korean).
- Motulsky, H. and A. Christopoulos. 2003. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression. A practical guide to curve fitting. GraphPad Software Inc. San Diego. CA., USA.
- NeSmith, D.S. 1993. Plant spacing influences watermelon yield and yield components. *HortScience* 28:885-887.
- Oh, D.J., C.Y. Lee, S.M. Kim, G.Y. Li, S.J. Lee, and D.Y. Hwang. 2010. Effects of chlorophyll fluorescence and photosynthesis characteristics by planting positions and growth stage in *Panax ginseng* C. A. Meyer. *Korean J. Medicinal Crop Sci.* 18:65-69.
- Park, M.H., J.W. Choi, Y.B. Kim, M.H. Kim, H.Y. Won, S.Y. Shin, and J.G. Kim. 2014. Effect of modified atmosphere packaging on postharvest quality of kohlrabi. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 32:655-665(in Korean).
- Reiners, S. and D.I.M. Riggs. 1997. Plant spacing and variety affect pumpkin yield and fruit size, but supplemental nitrogen dose not. *HortScience* 32:1037-1039.
- Takatsuji, M. 2008. Definition and meaning of the plant factory, p. 8-13. In: M. Takatsuji (ed.). *Plant factory*. World Science Publishment, Seoul, Korea.
- Uoon, C.I., M.K. Cha, Y.A. Jeon, and Y.Y. Cho. 2017. Optimal cultivar selection of Kohlrabi for hydroponics culture in a closed-type plant factory system. *Protected Hortic. and Plant Fac.* 26:297-300(in Korean).