

식물공장에서 인공광원이 결구상추의 생육에 미치는 영향

조영렬 · 한동욱 · 이용범

서울시립대학교 문리과대학 환경원예학과

Effect of Artificial Light Sources on the Growth of Crisphead Lettuce in Plant Factory

Cho, Young Ryul · Hahn, Dong Wook · Lee, Yong Beom
Dept. of Env. Hort. The Univ. of Seoul. Seoul 130-743, Korea

Abstract

This experiment was conducted to find out the effect of artificial light sources (high-pressure sodium lamp, metal halide lamp and fluorescent lamp) on growth of crisphead lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a plant factory. No significant differences in leaf fresh and dry weight were presented among them. Lettuce plants grown under fluorescent lamp showed the lowest growth. Considering the growth of lettuce and efficiency of lamps, it is worth using HPS (high-pressure sodium) lamp in plant factories. The leaves of lettuce plants grown under artificial light sources showed tipburn symptoms at 14th day after transplanting. The beginning of tipburn symptom have been seen on the ninth to tenth leaves from the cotyledons. It is estimated that the occurrence of tipburn was related to rapid growth and K uptake of the lettuce plants. The Ca, Mg, Cu and Zn elements tended to be accumulated in the nutrient solutions but the T-N, P, Fe and Mn elements keep in balance in them.

주 제 어 : 인공광, 결구상추, 무기영양, 식물공장, 잎끝마름증

Key words : artificial light, crisphead lettuce, mineral nutrition, plant factory, tipburn

서 언

식물공장이란 시설내에서 환경제어를 통하여 고품질의 작물을 대량생산하는 체계를 말하는데, 자동화 및 무인재배시스템이 가능하며 미래지향적인 농업의 한 양식이라 할 수 있다^{6,8,12)}. 식물공장은 유럽과 미주 등지에서 시작되어 최근에는 일본에서도 많은 관심을 가지고 연구와 실용화를 추진하고 있다. 국내에서는 1980년 말부터 양액재배에 대한 관심을 가지기 시작하면서 1990년대 원예시험장에서 이동형 상추재배시스템을 공장형으로 처음 만들었다⁸⁾. 식물공장에 주로 이용되는 인공광원으로는 고압나트륨등, 메탈할라이드등 및 형광등 등이 있다^{8,10,12)}. 이들 인공광원들은 광량과 광질이 서로 다르기 때문에 그 파장의 종류에 따라 식물생육이 달라지게 된다^{4,5,8,10,13)}. 아직까지 식물생육을 대상으로 한 인공광원에 대한 연구는 부족한 실정이다.

지금까지 세계적으로 알려진 식물공장에서는 주로 채소류를 대상으로 이루어지고 있는데, 제어가 비교적 용이한 상추, 시금치 같은 엽채류가 주종을 이루고, 일부 토마토와 오이같은 과채류도 시도되고 있다. 식물공장의 생육한 채소의 생장은 매우 빠른 것이 특징이다. 그러나 이러한 빠른 생장율에 따른 양수분 흡수에 문제가 발생하고 배양액 환경의 변동도 심하기 때문에 엽채류의 잎끝마름증(tipburn)^{1,2,3,4,7,12)} 과 과채류의 배꼽썩음과(blossom-end-rot)¹³⁾의 발생이 많다고 한다.

따라서, 본 실험은 완전제어형 식물공장에서 고압나트륨등, 메탈할라이드등과 형광등과 같은 인공광원 처리에 따른 결구상추의 생육, tipburn 발생 및 배양액속의 무기이온 변화를 검토하고자 실시하였다.

재료 및 방법

본 실험은 서울시립대학교 대형컨테이너 [12(L)×2(W)×3m(H)]에 완전제어형 식물

공장시스템을 설치하여 실험하였다. 공시작물은 결구상추(*Lactuca sativa* L.) 'L-6'품종(Mikadeo Seed Co.)을 1996년 2월 27일에 파종하여 3월 20일 베드(1.5(L)×9(W)×0.8m(H))에 정식하였다. 인공광원으로는 고압나트륨등(430W), 메탈할라이드등(250W)과 형광등(40W)를 사용하였다. 광원수는 고압나트륨등 3개, 메탈할라이드등 3개와 형광등 14개를 사용하여 광합성유효광량자속밀도(Photosynthetic photon flux density, PPF)를 $200 \pm 30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 으로 조절하였다. 광원과 베드 표면간의 거리는 고압나트륨과 메탈할라이드가 75~80cm, 형광등이 30~35cm였다. 조명시간은 아침 6시부터 저녁 8시까지 14시간 조명하였다. 온도조절은 주간 20~25°C, 야간 20°C로 관리하였으며, 상대습도는 $70 \pm 5\%$ 로 관리하였다. 배양액은 지바대액을 기준으로 하여 조성하였으며, 재배방식은 박막수경(NFT)방식으로 하였다. 배양액의 pH는 5.5~6.0으로, 배양액농도는 $1.5 \pm 0.2 \text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 로 자동조절하였다. 이산화탄소는 $1,000 \sim 1,200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 로 공급해 주었으며, 정식 3일후부터 5일 간격으로 배양액을 분석하였다. 그리고 정식 6일후부터 5일 간격으로 생육을 조사하였으며, 휴대용 광합성측정기(LI-6200, LI-COR)로 광합성을 측정하였다. 실험이 끝날 때까지 배양액은 교체하지 않았다.

결과 및 고찰

인공광원에 따른 결구상추 생육은 정식 17일에서 엽수, 엽면적, 지상부 생체중과 지상부 건물중의 유의적인 차이는 없었으며, 최대엽장과 최대엽폭은 메탈할라이드등에서 다른 광원보다 높게 나타났다. 고압나트륨등에서 엽장과 엽폭의 길이가 비슷하였지만, 메탈할라이드등과 형광등은 엽폭의 길이가 엽장의 길이보다 더 길었다. 전반적인 생육은 형광등에서 가장 낮게 나타났다. 식물공장에 이용할 수 있는 인공광원

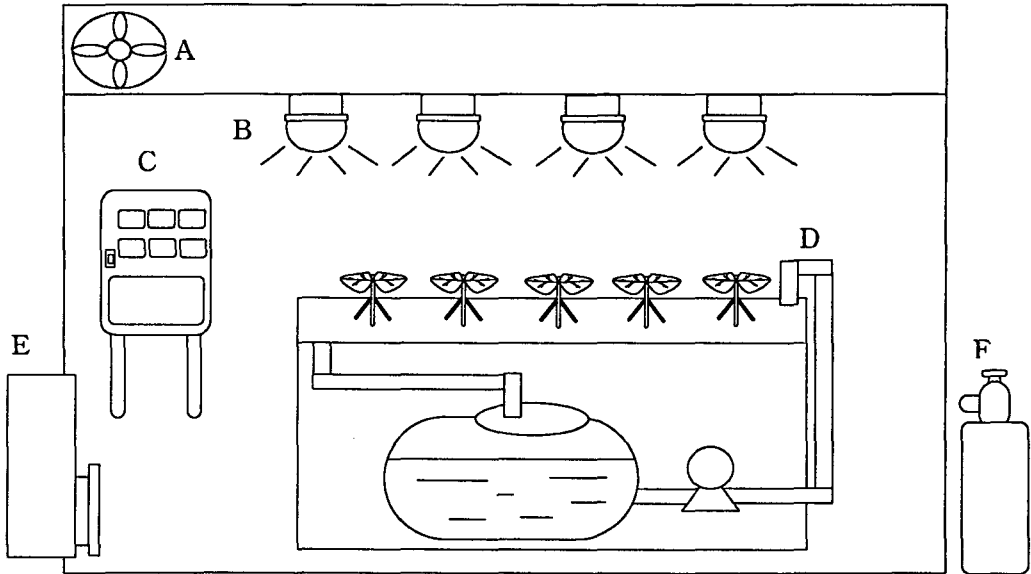


Fig 1. Schematic diagram of nutrient film technique(NFT) in the plant factory. The main features are A; fan, B; artificial light (high-pressure sodium lamp, metal halide or fluorescent) lamp, C; control system, D; NFT system, E; heating and cooling system and F; CO₂ supply. The environmental conditions are PPFD; $200 \pm 30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, air temp.; day 20~25°C and night 20°C, relative humidity $70 \pm 5\%$ and CO₂; $1,000 \sim 1,200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. The nutrient solution conditions are pH;5.5~6.0, EC; $1.5 \pm 0.2 \text{m S} \cdot \text{cm}^{-1}$ and solution temp.; $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

으로는 고압나트륨등, 메탈할라이드등과 형광등이 좋지만, 메탈할라이드등은 램프의 수명이 짧은 단점⁹⁾이 있으며, 형광등은 광원수가 많이 투입되고, 광원교체할 때 많은 노동력이 투입되는 단점이 있다. 그리고 인공광원의 효율은 고압나트륨등, 메탈할라이드등, 형광등순으로 높기 때문에, 고압나트륨등을 사용하는 것이 경제성면에서 좋다고 생각된다. 또한 고압나트륨등은 식물광원에 유용한 파장을 내는 HID(high intensity discharge)램프보다도 효율성이 더 크다는 보고도 있다⁵⁾. 잎끝마름증 발생율은 모든 처리구에서 발생하였는데, 정식후 14일에 처음으로 발생하였으며, 자연으로부터 9~10번째 잎에서 처음 증상이 관찰되었다. 광원간에는 메탈할라이드등에서 가장 높게 나타났다(표 1).

Daniel과 Tibbitts(1991)³⁾는 제어된 환경하에서 생육한 결구상추의 잎끝마름증은

보통 자연으로부터 8번째 잎에서 처음 발생한다고 하였다. 본 실험도 거의 유사한 범위에서 나타났으며, 이에 대한 정밀한 연구가 필요한 것으로 보였다.

인공광원에 따른 광합성은 고압나트륨등에서 가장 높게 나타났으며, 메탈할라이드등과 형광등 순이었다. 기공저항은 메탈할라이드등이 가장 높고 형광등과 고압나트륨등 순이었다(표 2).

Table 1. Effect of artificial light sources on growth of crisphead lettuce at 17 days after transplanting

Light Source ^z	No. of leaves	Leaf length	Leaf width	A/B ratio	Leaf area (cm ²)	Leaf fresh weight. (g · plant ⁻¹)	Leaf dry weight. (g · plant ⁻¹)	Tipburn (%)
		(cm) A	(cm) B					
HPS	11.7	12.1 b ^y	12.3 b	0.98 a	392	18.2	1.16	38.5
M H	13.7	13.3 a	15.2 a	0.88 a	486	19.9	1.23	46.2
F L	11.3	10.9 c	14.2 a	0.77 b	377	17.2	1.02	37.5

^z HPS : high-pressure sodium lamp, MH : metal halide lamp, FL : fluorescent lamp

^y Means separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level

Table 2. Effect of artificial light sources on CO₂ assimilation of crisphead lettuce at 21 days after transplanting.

Light Source ^z	Leaf temperature (°C)	Photosynthetic photon flux density (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	Stomatal resistance (s · cm ⁻¹)	CO ₂ assimilation rate (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)
HPS	25.8	227	0.678	6.61
M H	23.8	187	0.849	5.67
F L	23.9	177	0.729	5.64

^z See Table 1.

공광원에 따른 작물생장율(crop growth rate)과 엽면적지수(leaf area index)간의 관계를 보면, 세 처리구의 순동화율(net assimilation rate)이 초기에 빠른 생육을 보였다(그림 2와 그림 3). 정식후 17일까지 상추의 빠른 생장율을 볼 수 있는데, 이러한 빠른 생장율로 인해 잎끝마름증과 관련이 있다고 생각되어진다. 즉, 작물의 생육속도에 비해 칼슘의 흡수이동속도가 따라가지 못하여 나타난 현상으로 파악된다.

여러 보고서에 위하면, 잎끝마름증은 식물 생장율과 관련이 있다라고 하는데, 그 이유는 칼슘에 대한 식물의 흡수와 분배가 일치하지 않는 쪽으로 증가하였기 때문이라고 한다(1,2,3,7,12).

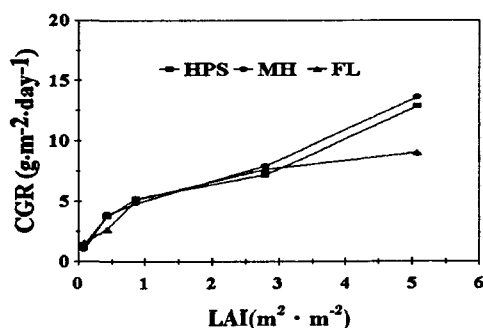


Fig. 2 Relationships between crop growth rate and leaf area index of crisphead lettuce depending on artificial light sources.

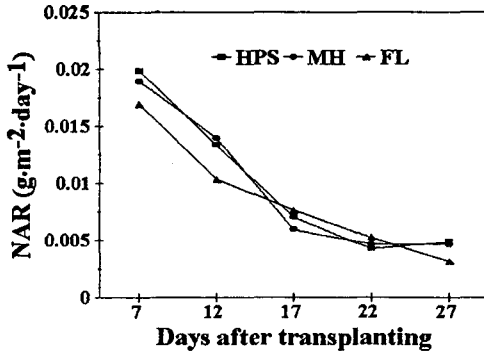


Fig 3. Changes in net assimilation rate of crisphead lettuce depending on artificial light sources.

정식후 34일에 인공광원에 따른 엽내 무기 성분은 정상적인 함량보다 인, 칼슘과 마그네슘 함량이 낮게 나타났으며, 철, 구리와 망간 함량이 높게 나타났다. 다른 성분들은 정상적인 함량을 보였다(표 3).

Maruo 등(1991)은 태양광 이용형 식물공장에서 반결구상추에 대한 고압나트륨등과 메탈 할라이드의 혼합보광은 엽내 T-N와 K의 흡수 증가를 유도한 반면, P와 Ca의 흡수 감소가 나타난다고 하였으며, 반면에 Tremblay 등(1984)은 점용방식의 식물공장에서 토마토에 대한 고압나트륨등의 보광은 엽내 P, Ca, Mg, Fe과 Mn의 흡수 증가와 T-N와 K의 흡수 감소를 보인다고 하였다.

인공광원에 따른 배양액내 다량원소의 변화를 살펴보면, 세척리구의 전질소와 인은 정식 초기와 수확 후기의 함량변화가 없었다. 그러나 칼슘과 마그네슘은 축적되는 경향을 보였으며, 칼륨은 계속해서 감소되는 경향을 보였다(그림 4). 정식후 12일부터 상추의 칼륨흡수가 계속 증가되었는데, 칼륨의 흡수 증가로 인해 칼슘과 마그네슘의 흡수가 억제되었다고 생각된다. Cresswell(1993)과 Daniel 등(1991)도 칼슘의 흡수는 다른 양이온(특히 암모늄과 칼륨) 사이의 길항작용 때문에 감소되어질 수 있는데, 특히 칼륨과 칼슘간의 길항작용이 상추의 잎끝 마름증 발생의 한 요인이라고 하였다. 미량원소의 변화를 살펴보면, 세척리구의 철과 망간은 정식 초기와 수확 후기의 함량변화는 없었다. 그러나 구리와 아연의 함량이 축적되는 경향을 보였다(그림 5). 인공광원에 따른 배양액내의 다량원소와 미량원소의 흡수패턴간에는 별다른 차이를 보이지 않았다.

이상 결과를 볼 때, 완전제어형 식물공장에서 인공광원중 다른 광원에 비하여 경제성이 높은 고압나트륨등을 사용하는 것이 좋을 것으로 생각되지만, 식물공장에 이용할 수 있는 고효율 식물육성용 램프의 개발이 필요하리라 생각된다. 그리고 식물공장에서 상추의 상품가치를 크게 좌우하는 잎끝마름증 발생에 대한 원인에 대해 계속적으로 연구가 필요하였다.

Table 3. Effects of artificial light sources on the nutrient content of crisphead lettuce leaves at 34 days after transplanting

Light Source ²	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
	- % -					- ppm -			
HPS	4.43	0.66	9.80	0.84	0.24	187	15.8	487	160.5
M H	4.70	0.53	9.53	0.62	0.22	154	15.2	250	78.5
F L	5.37	0.50	8.61	0.71	0.24	153	16.8	304	70.9

² See Table 1.

조·한·이 : 식물공장에서 인공광원이 결구상추의 생육에 미치는 영향

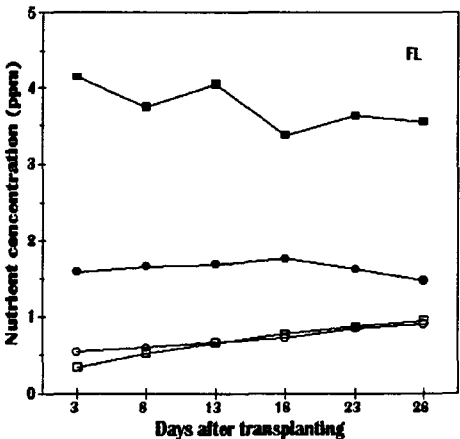
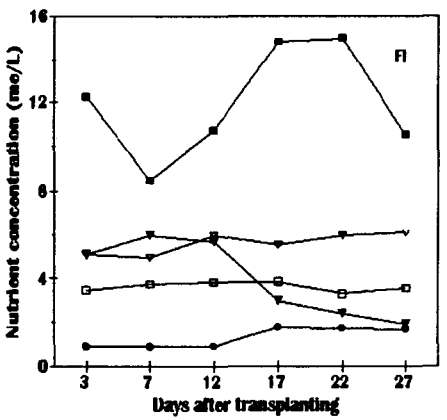
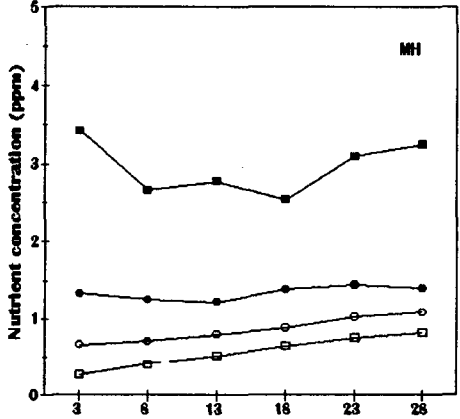
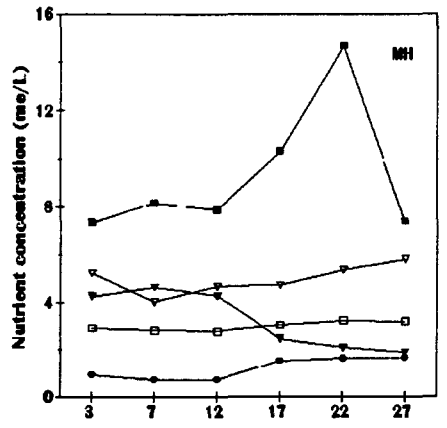
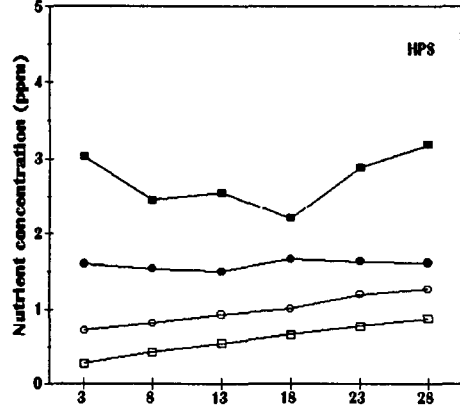
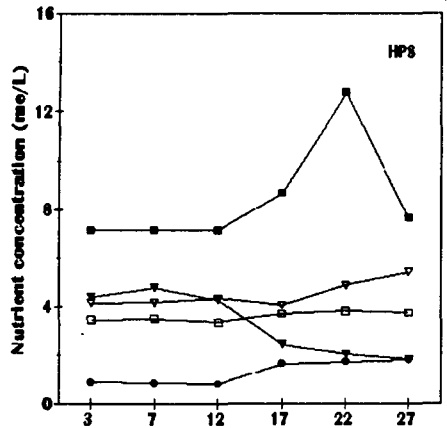


Fig 4. Changes in the macroelement concentrations of the nutrient solution depending on artificial light sources

Fig 5. Changes in the microelement concentrations of the nutrient solution depending on artificial light sources

적 요

완전제어형 식물공장하에서 인공광원에 따른 결구상추의 생육, 잎끝마름증과 배양액속의 무기이온 변화를 검토하고자 본 실험을 수행하였다. 인공광원에 따른 지상부 생체중과 건물중간의 유의적인 차이는 없었으나 전반적인 생육은 형광등에서 가장 낮게 나타났다. 인공광원중 생육과 램프의 경제성을 고려해 볼때, 고압나트륨등을 사용하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 인공광원에 따른 잎끝마름증 발생시기는 정식 후 14일에 처음 발생하였으며, 발생부위는 자엽으로부터 9~10번째 잎이었다. 발생원인으로는 빠른 성장율과 상추의 칼륨흡수로 추정되었다. 그리고 인공광원에 따라 배양액속의 무기성분 변화를 보면, 세처리구 모두 칼슘, 마그네슘, 구리와 아연 함량 등은 축적되는 경향을 보였으며, 전질소, 인, 철과 망간 함량등은 안정적이었다.

인용문헌

1. Collier, G. F. and V. C. Huntington. 1983. The relationship between leaf growth, calcium accumulation and distribution and tipburn development in field-grown butterhead lettuce. *Scientia Hort.* 21(2) : 123-128.
2. Cresswell, G. 1995. Management of tipburn in lettuce. *Proc. Australian Hydroponic Conf.* p45-50.
3. Daniel, J. B. and T. W. Tibbitts. 1991. Calcium localization in lettuce leaves with and without tipburn : Comparison of controlled environment and field-grown plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116(5) : 870-875.
4. Fukuda, N., H. Ikeda and M. Nara. 1992. Effects of light quality on the absorption of water and minerals of lettuce. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 61(2) : 310-311.
5. Cathey, H. M. and L. E. Campbell. 1980. Light and lighting systems for horticultural plants. *Horticultural Reviews.* Vol. 2. p527-537.
6. Ito, T., T. Maruo, K. Suzuki and K. Matsuo. 1991. The specification of research facility "TEPCO BIOTORY" and its environmental facts. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 60(2) : 260-261.
7. Maruo, T., Y. Moro, T. Ito, K. Suzuki and K. Matsuo. 1991. Plant growth and mineral uptake of lettuce under artificial light condition. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 60(2) : 262-263.
8. 박권우. 1997. 공장형 원예산업시대의 개막과 전망Ⅱ - 국내외 식물공장의 현황과 장래 -. (사) 호남온실작물연구소. p9-25.
9. 박권우, 김영식. 1992. 수경재배의 이론과 실제. 고려대학교 출판부. p224-250.
10. 박권우, 신영주, 이용범. 1992. 엽채류의 환경제어 모델연구 Ⅱ. 인공광 조건에 따른 식물의 생육변화. *한국생물생산시설환경.* 1(2) : 135-141.
11. Ryder, E. J. 1979. Leafy salad vegetables. AVI, Westport, Conn.
12. 손정익. 1993. 식물공장-미래의 도시농업. *한국생물생산시설환경.* 2(1) : 69-76.
13. Tremblay, N., M. J. Trudel and A. Gosselin. 1984. Influence of supplemental lighting(HPS) on yield and mineral nutrition of tomato plants grown in hydroponic culture. *ISOSC Proc.* p697-703.
14. Carl, B. 1996. The handbook to hydroponic nutrient solutions. Casper Publication Pty Ltd. p30-31.

