

상추 수경재배시 생리적 산, 알칼리를 이용한 배양액 pH의 자동 조절¹⁾

김혜진 · 김영식
상명대학교 원예과학과

Automatic pH Control of Nutrient Solution by Physiological Fertilizers in Lettuce Hydroponics

Kim, Hye Jin · Kim, Young Shik
Dept. of Horticultural Science, Sangmyung Univ., Chonan 330-180, Korea

Abstract

The effectiveness of physiological or chemical acid-alkali solution was investigated as the method to control pH value of nutrient solution in hydroponics dynamically. Lettuces were cultivated using $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ as physiological acid and NaNO_3 as physiological alkali or H_2SO_4 as chemical acid in dynamic control system. The pH of nutrient solution was controlled satisfactorily in the range of pH 5.5-6.5, regardless of treatments. Chemical acid changed pH of solution faster than physiological acid when supplied to the nutrient solution. Any of them did not show any harmful symptom. It is recommended that chemical acid is preferred during the growing stage and physiological acid like as $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ is preferred from several days before harvest stage.

키 워 드 : 상추, 배양액, pH 조절, 수경재배

Key words : lettuce, nutrient solution, pH control, hydroponics

서 론

수경재배 특히 담액수경에서 가장 중요한 것중의 하나로 pH를 꼽을 수 있다. pH는 식물이 생육하는데 있어서 큰 영향을 미치므로 생육기간동안 조절을 잘 해주어야 품질도 좋고 상품성이 우수한 산물을 생산할 수 있다. 또한, pH는 영양분의 흡수와 양분의 용해도에 결정적인 영향을 미치므로 배양액의 pH 조절

은 중요하다. pH가 4.5 이하로 떨어지면 Ca, Mg, K 등과 같은 알칼리성 염류가 불용화되고, 반대로 pH가 7.0 이상일 때에는 Fe와 같은 것이 침전되어 식물이 이용할 수 없게 된다. 그리고 일반적으로 배양액의 pH가 낮을 때에는 음이온의 흡수가 좋고 반대로 pH가 높을 때에는 양이온의 흡수가 좋다¹⁾⁷⁾. 수경재배에서 요구되는 최적의 pH는 5.5-6.5인데, pH를 최적의 상태로 조절해 주는 방법으로

¹⁾ 본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비에 의해 수행되었음.

일반적으로 산이나 알칼리 용액을 사용한다. 그러나 실제 재배의 경우, 배양액 조성과 식물의 흡수생리의 근본적인 차이 때문에 화학적인 방법만으로는 배양액 pH의 변화를 막기 어렵다. 이에 따라 본 연구에서는 비료의 흡수생리를 이용한 생리적 산, 알칼리 비료에 의한 배양액 pH의 자동제어 가능성을 시도하였다. 생리학적, 화학적 작용의 산, 알칼리는 각각 장단점을 가지고 있는데, 생리학적인 산, 알칼리의 경우 식물 생장에 필요한 영양분을 공급함과 동시에 pH 조절을 할 수 있으므로 식물에 큰 해가 가지 않으면서 pH 조절을 할 수 있다. 그러나 그에 따르는 과부족 현상을 유발할 수 있어 유의해야 한다. 화학적 산, 알칼리의 경우 사용하는 산, 알칼리가 식물에 해가 되는지를 알아야 하고 그 화학물질로 인하여 다른 이온들의 흡수가 저해되는지를 알아야 한다. 그러나 식물생장 기간중 과잉증을 유발할 가능성은 생리학적인 산, 알칼리에 비하여 작은 편이다.

상추를 생산하는데 있어 중요한 생산량과 품질은 모두 배양액에 의하여 크게 영향을 받는다. 특히, 상추의 품질을 평가하는데 중요한 염중 nitrate 함량은 수확전 일정기간 동안에 질소원의 비율등을 변화시키므로써 함량을 줄일 수 있다. 즉, 배양액에 $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 많을수록 염중 nitrate 함량이 적고, 당함량이 많아져서^{21, 22)} 품질이 좋아지기 때문에 $\text{NH}_4\text{-N}$ 을 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 상추는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 선호식물이기 때문에 배양액에 $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 소량 존재하더라도 배양액의 pH가 저하되므로 양분흡수의 불균형이 일어나는 등의 문제점이 있어, 질소형태를 조절하여 배양액을 조절하는 것이 용이하지 않다. 즉, 상추를 수경재배하는 경우에 질소원의 종류에 따라, 배양액 pH가 변화하는 점 및 품질에 차이가 있는 점에 착안하여 $\text{NH}_4\text{-N}$ 을 함유하고 있는 비료를 이용하여 배양액의 pH를 자동제어할 수 있다면 성장과 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 사료되어 본 실험을 수행하게 되었다. $\text{NH}_4\text{-N}$ 을 함유하고 있는 화합물로는 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 등 여러 가지가

있으나, 산으로의 효과, 과부족의 영향 등을 고려하여 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 를 조절제로 사용하였다. pH의 안정적인 수준을 유지하기 위하여 사용한 산, 알칼리 중 생리적 산, 알칼리로는 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ^{12, 15, 16)}, KH_2PO_4 ¹³⁾, 화학적 산, 알칼리로는 NaOH (1M), HCl (1M)⁴⁾, KOH (1N), H_2SO_4 (1N)¹⁸⁾ 등과 단독으로 NaOH ^{14, 17, 27)}만을 사용하든가 $\text{HCO}_3^{5)}$ 를 사용한 경우도 있다.

이러한 pH 조절은 자동적으로 행해야 효과가 큰데, 시설내에서는 식물 생육에 미치는 각종 환경요인을 제어하는 것이 가능하며 이러한 작물생산의 장점을 극대화 하기 위해 자동제어시스템의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{9, 20, 25, 26)}. 즉 식물공장 시스템과 이에 소요되는 계측 및 제어장치에 관한 연구가 체계적으로 이루어지고 있는데, 이 시스템에 pH 자동조절장치를 첨가하는 것이 일반적이다^{10, 23, 24)}.

본 실험은 기존의 pH 자동조절장치에 생리적 산, 알칼리 비료를 이용함으로써 화학적인 산, 알칼리 용액을 이용한 pH 자동제어와 비교하여, pH의 안정을 유지하며 성장과 품질이 우수한 작물을 생산하고자 수행되었다.

재료 및 방법

본 실험은 1996년 1월 23일부터 1996년 5월 2일까지 상명대학교 원예과학과 수경재배 전용 유리온실에서 수행하였다. 공시작물은 결구상추(*Lactuca sativa* var. *capitata*)인 'Sacrament'(Takii 종묘)로, 종자는 하루동안 물에 침지한 것을 사용하였다. 96년 1월 23일에 폴리우레탄 스폰지(2.2cm × 2.2cm × 2.2cm)에 2mm 깊이로 2립씩 파종하였으며, 2월 2일에 육묘베드에 이식하고 1/2농도의 야마자키 상추용 배양액을 공급한 후 순환시켰다. 육묘베드는 스티로폼제로, 가로 120cm, 세로 240cm, 높이 10cm였다. 2월 10일에 솟아주고, 2월 22일에 실험베드로 이식한 후부터 배양액의 농도를 3/6배, 4.5/6배, 표준액으로 3단계로 분리하여 3일간격으로 점차 농도를 높여 3

월 1일에는 표준액으로 만들어 주었다. 실험 베드는 스티로폴제로, 가로 240cm, 세로 20cm, 높이 10cm였으며, 재식거리는 25cm, 줄 사이는 40cm였다. 실험처리는 배양액의 pH를 맞추기 위해 산용액으로는 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, H_2SO_4 를 사용하였으며 알칼리용액으로는 NaNO_3 를 사용하였다. 처리구는 H_2SO_4 처리, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 와 NaNO_3 처리, 용수의 pH를 6.0으로 미리 조정해준 처리, 용수를 그대로 사용한 처리 등 4처리구로 하였다. H_2SO_4 는 0.3N로 희석된 것을 사용하였다. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, NaNO_3 는 2M로 만들어 주었다. 처리는 4월 23일에 시작하였으며, 수확일은 5월 2일이였다. 실험기간동안 본 실험실에서 제작한 자동제어시스템으로 pH의 조절을 자동적으로 제어하였다. 적정 pH 범위는 6.5-5.5사이로 하였으며, 정량펌프(금성사, PRH-007PHL, 최대토출량 75ml/분)를 이용하여 시간마다 일정하게 정해진 양이 들어갈 수 있도록 제어해 주었다. 그외에 자동계측시스템으로 EC, 액온 등을 조사하였다. 상품성을 평가하기 위하여 수확시 결구무게, 결구폭, 지상부중 등을 측정하였다. 수확시 배양액을 분석하였는데, K, Ca, NH_4 는 ionmeter(TOA, IM-40S)로, NO_3 와 P는 spectrophotometer를 이용하여 각각 410nm, 470nm에서 분석하였다.

결과 및 고찰

pH를 조절해 주기 위해 사용하는 H_2SO_4 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, NaNO_3 는 각각의 특성이 다르기 때문에 공급해 주어야 할 시간과 양을 달리 해주는 것이 좋다. 즉, H_2SO_4 은 강산, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 은 약산이기 때문에 해리도에 차이가 있으며, 이들 세가지는 기존의 배양액에 존재하는 절대량이 다르기 때문에 pH 조절을 위하여 공급되는 양이 전체 배양액의 이온흡수 환경에 기여하는 정도가 틀리므로 특성에 맞추어 주는 것이 좋다. 특히 생리적 산, 알칼리 비료의 경우는 식물로의 흡수속도나 이온간의 상호작용등 고려해야 할 점이 많은 관계로 더욱

복잡한데, 이에 관한 연구가 미진한 관계로 일회당 공급시간을 10초에서 70초에 걸쳐 10초 간격으로 설정하여 pH 변화를 조사하였다. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 와 NaNO_3 의 농도를 2M, H_2SO_4 를 0.3M로 설정하여 공급한 결과, 40초보다 장시간일 경우에는 pH의 변화가 급하여 설정범위를 벗어나는 경우가 발생하였으며, 40초보다 단시간일 경우에는 변화가 느리게 나타나 이후의 실험에는 40초 동안 공급하였다(결과 생략). 본 시스템에 사용한 정량펌프에서는 40초당 50ml가 공급된다.

전반적으로 H_2SO_4 처리와 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ - NaNO_3 처리로 pH를 5.5-6.5의 수준으로 조절할 수 있었다. pH를 H_2SO_4 으로 조절한 처리구에서는 큰 폭으로 떨어지는 변화없이 5.5-6.5 사이의 값을 유지하여, H_2SO_4 를 이용하는 것은 상당히 안정적인 것으로 나타났다. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ - NaNO_3 로 조절한 처리구의 경우는 거의 5.5-6.5의 수준이지만 pH가 상한치보다 높았을 경우에 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 가 투여되면 H_2SO_4 처리구와 비교하여 pH가 하한치 미만으로까지 저하하는 현상을 보여 pH의 값이 4.2까지 떨어졌다(그림 1). 이것은 H_2SO_4 는 배양액내에서 바로 해리되어 효과를 미치는 반면에, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 는 배양액에 들어가서 식물체로 흡수되는 과정을

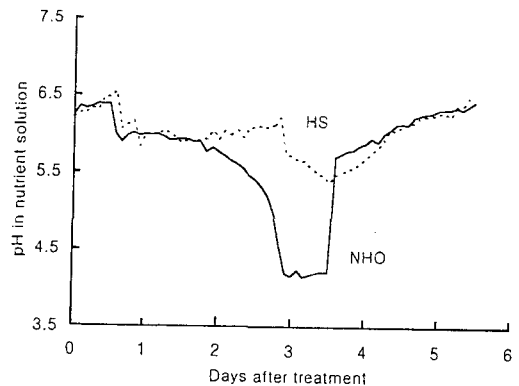


Fig. 1. Change of pH. The pH was controlled by $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ and NaNO_3 (NHO) or H_2SO_4 (HS).

거치기 때문에 생긴 현상으로 사료된다. 따라서 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 의 농도를 10배로 희석하여 실험을 진행하였다. 그 결과 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 에 대한 반응은 H_2SO_4 보다는 크게 나타났지만 희석하기 전처럼 급격하게 pH가 설정해준 범위 이상을 벗어나지는 않았다(그림 2). 그러나 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, NaNO_3 로 조절하는 것 보다는 H_2SO_4 으로 조절하는 것이 급격히 떨어지지도 않고 설정해준 범위내에서 안정적으로 pH를 조절할 수 있는 것으로 나타났다.

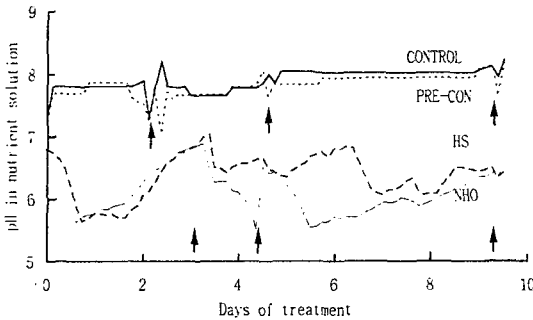


Fig. 2. Change of pH. The pH was controlled by $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ and NaNO_3 (NHO) or H_2SO_4 (HS). CONTROL: uncontrolled, PRE-CON: precontrolled to pH 6.0 before supply and uncontrolled during cultivation. Arrows show supply of nutrient solution.

본 시스템에서는 시판되는 양액조절기에서와 같이 화학적 산 처리구에서는 알칼리 용액을 포함시키지 않았는데, 식물체가 생장함에 따라 pH의 변화가 크게 되는 것을 감안한다면 화학적 산, 알칼리의 경우 H_2SO_4 로만 조절하는 것도 가능하겠지만 만약의 경우 기계의 이상으로 인하여 pH가 계속적으로 떨어지는 경우는 알칼리로 보정해 주어야 할 필요가 있다. 때문에 H_2SO_4 로 조절해줄 경우에도 설정치 이상으로 떨어지는 경우를 감안하여 알칼리를 제어장치에 포함시키는 것이 필요하다.

용수의 pH를 조절한 처리구와 조절하지 않은 처리구의 차이를 보면 H_2SO_4 으로 pH를 6.0

으로 맞춰준 처리구의 경우 비료와 섞어 배드에 넣어주었을 때는 맞춰준 pH가 식물체와 반응하여 6.0의 수준을 유지하지 못하고 계속적으로 높아지는 경향을 보였다(그림 2). 용수의 pH를 맞추지 않고 처리한 것은 pH가 8.4까지도 올라갔다. 즉, 용수의 pH를 맞추고 배양액을 주는 것은 별도로 pH를 조절하는 것과 비교했을 때 확실한 조절을 해줄 수는 없으나 하지 않았을 때 올라가는 pH의 수치만큼은 올라가지 않았다.

배양액을 분석한 결과, 질소원과 황산을 이용하여 pH를 조절한 처리구에서 다른 처리구들과 비교하여 Ca를 제외하고는 이온의 양이 월등히 많았다(그림 3). $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ - NaNO_3 처리구의 경우 실제로는 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 가 추가로 공급되었으므로 NO_3 가 많이 남아있는 것은 NH_4 와 NO_3 와의 경쟁때문으로 추정된다²⁾. K의 잔존량이 많은 것도 NH_4 와의 길항작용으로 생각된다. 전반적으로 H_2SO_4 처리구에서 양분 잔존량이 가장 많았는데, NO_3 의 경우는 SO_4 와의 길항작용일 수 있으나, 자세한 원인은 추후 연구되어져야 할 것으로 사료된다.

수확 후, 상품성을 비교하기 위해서 결구무게, 결구폭, 지상부중을 조사하였다(표 1). 결구무게는 질소원으로 처리한 것이 가장 무거

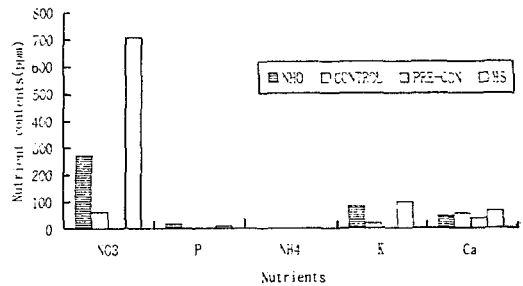


Fig. 3. Ionic contents in nutrient solution at harvest. CONTROL: pH was uncontrolled. PRE-CON: precontrolled to pH 6.0 before supply and uncontrolled during cultivation. NHO: controlled by $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ and NaNO_3 . HS: controlled by H_2SO_4 .

있으며, 결구폭은 처리간에 유의성이 없었다. 지상부중도 질소원으로 처리해준 것이 가장 무거웠는데, 질소원 처리구와 황산 처리구간에는 유의성이 없었다. 각 처리마다의 결구폭과 무게와의 관계를 보면 질소원으로 처리해준 것과 용수의 pH를 조절한 것은 결구폭은 작으나 결구무게가 컸다. 이것은 결구가 형성하지 않고 단단하게 쌓여 있다는 것을 시사한다. 반대로 황산으로 조절한 처리구의 경우 결구폭은 상당히 값이 높으나 결구무게는 낮게 나타나, 구의 밀집정도가 형성하다는 것을 시사했다. 결구폭을 제외하고는 질소원으로 조절한 것과 황산으로 조절한 것의 차이는 크지 않았다.

Table 1. Fresh weight and head width of lettuce.

External Qualities	Treatment			
	NHO [†]	HS	CONTROL	PRE-CON
Head FW(g)	1003a [‡]	931a	813b	921ab
Shoot FW(g)	1330a	1264a	1127b	1238a
Head width(cm)	15.43	15.93	15.43	14.80

[†] In NHO pH was controlled by $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ and NaNO_3 . In HS pH was controlled by H_2SO_4 . In CONTROL pH was not controlled. In PRE-CON pH was controlled to pH 6.0 before supply.

[‡] Mean separation within row by Tukey test, 5 % level.

배양액 pH의 조절방법으로 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 나 NaNO_3 와 같은 생리적 산, 알칼리 비료를 이용하는 경우, 식물이 성장하면서 흡수하는 정도에 따라 pH의 변화가 심해질 수 있다. 상추의 경우 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 는 상추가 선호하는 NH_4 를 가지고 있기 때문에 상추가 왕성하게 영양분을 흡수할수록 pH의 조절이 용이한 특성을 가진다⁷⁾. 또한, 수확전 엽중 nitrate 함량을 줄이기 위하여 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 대한 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 비율

을 높이는 경우가 있는데^{2, 3, 7, 9, 15)}, 이럴 때 특히 NH_4 를 함유하는 비료의 효과가 클 것으로 사료된다. 반대로, 생리적 알칼리로 쓰는 NaNO_3 의 경우는 상추가 NO_3 를 다량 섭취할 경우 질산염 축적의 원인이 될 수 있으므로 주의를 요한다^{3, 27)}. 그러나 일반적으로 배양액의 pH를 높이는 경우는 거의 발생하지 않으므로 실제 문제가 되지는 않을 것으로 사료된다. 화학적 산인 H_2SO_4 의 경우는 질소에 비해 SO_4 가 흡수되는 양이 적어 배양액에 축적되기 쉬우나, 황 자체에 의한 과잉증은 질소에 비해 적은 것으로 나타나 있어²⁰⁾, 배양액의 pH만을, 안정적으로 조절하는 데는 적합한 것으로 사료된다. 상품성과 관련하여 질소원으로 조절한 것이 황산으로 조절한 것보다 무게나 폭, 지상부중에 있어서 수치상 높기는 했지만 유의적인 차이는 없었는데, 장기간 재배하는 경우에 대하여 연구가 진전될 필요가 있다.

본 실험의 결과, 배양액의 pH를 자동으로 조절하는 경우 생육 기간중에는 화학적 산, 알칼리를 이용하여 pH를 조절하고 상추에 있어서 중요한 질산염의 체내함량문제를 고려할 때, 대략 수확 일주일 전부터 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 를 화학적 알칼리와 겸해서 공급하여 높아지는 pH를 낮추고 동시에 흡수되는 NO_3 의 양을 NH_4 로 대체함으로써 안정적으로 pH를 조절하며 질산염의 함량을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

적 요

수경재배시 변화하는 배양액 pH를 동적으로 조절하기 위한 방법으로 생리적 산, 알칼리와 화학적 산, 알칼리의 효율성을 검토하였다. 배양액 자동조절시스템에 생리적 산, 알칼리로 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 및 NaNO_3 를 이용하고, 화학적 산으로 H_2SO_4 를 이용하여 상추를 재배한 결과, 처리에 관계없이 배양액의 pH를 안정적으로 조절할 수 있었다. 생리적 산, 알칼리의 경우 화학적 산, 알칼리보다 배양액 pH를 급격히 변화시켰으며, 그에 따른 해작용은 나타

나지 않았다. 그러므로 상추의 순수수경재배시 배양액의 pH를 자동제어 하기 위한 방법으로, 생육 기간중에는 화학적 산, 알칼리를 이용하여 pH를 조절하고 수확 며칠전부터 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 를 화학적 알칼리와 겸해서 공급하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

인 용 문 헌

1. Andersen, L. and N. E. Nielsen. 1002. A new cultivation method for the production of vegetables with low content of nitrate. *Scientia Horticulturae* 49: 167-171.
2. Boon, J. Van der and J. W. Steenhuizen. 1986. Nitrate in Lettuce on Recirculating Nutrient Solution. *Acta Hort.* 178:67-72.
3. Boon, J. Van Der, J. W. Steenhuizen and E. G. Steingr ver. 1990. Growth and nitrate concentration of lettuce as affected by total nitrogen and chloride concentration, NH_4/NO_3 ratio and temperature of the recirculating nutrient solution. *J. Hort. Sci.* 65(3): 309-321.
4. Bres, W. and L. A. Weston. 1992. Nutrient accumulation and tipburn in NFT grown lettuce at several potassium and pH levels. *HortScience.* 27(7): 790-792.
5. Collier, G. F. and V. C. Huntington. 1980. Incidence of pH and potassium on physiological disorders. *Natl. Veg. Res. Sta., Wellesbout Warwick, England. Rpt.* 30: 112-113
6. Drews, M., I. Schonhof and A. Krumbein. 1995. Amount and distribution of constituents of head lettuce. *Gartenbauwissenschaft.* 60(6): 287-293.
7. Gila, A. C. and W. B. Stanley. 1992. Diurnal fluctuations in nitrate accumulation and reductase activity in lettuce(*Lactuca sativa* L.) grown using nutrient film technique. *Acta Hor.* 323: 51-59.
8. Hicklenton, P. R. and M. S. Wolynetz. 1987. Influence of light- and dark-period air temperatures and root temperature on growth of lettuce in nutrient flow systems. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 112(6): 932-935.
9. 홍순호. 1990. 작물 생산 자동화를 위한 복합환경계측 시스템 개발. 서울대학교 석사학위논문.
10. 홍순호. 1995. Automatic control of growth environment for plant factory. 서울대학교 박사 학위논문.
11. Ikeda, H. and T. Osawa 1981. Nitrate- and ammonium-N absorption by vegetables from nutrient solution containing ammonium nitrate and the resultant change of solution pH. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 50(2): 225-230.
12. 김주희, 김혜진, 김영식. 1996. 수돗물을 用水로 사용한 결구상추의 水耕栽培時 인산암모늄이 培養液에 미치는 영향. *韓國園藝學會.* 37(2): 223-227.
13. 김영식. 방울토마토 담액수경재배시 KH_2PO_4 의 효과. *詳明大學校 産業科學研究.* 4: 63-69.
14. Koontz, H. V. and R. P. Prince. 1986. Effect of 16 and 24 hours daily radiation (light) on lettuce growth. *HortScience.* 21(1): 123-124.
15. 이문정, 김성은, 김영식. 1995. 방울토마토 담액재배시 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 농도에 기초한 배양액 조절. *생물생리산시설환경학회지.* 4(2):188-194.
16. 이문정, 김성은, 김영식. 1996. 방울토마토 담액육묘시 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 에 의한 배양액 산도 조절. *韓國園藝學會.* 37(2):214-217.
17. Masson, J., N. Tremblay and A. Gosselin. 1991. Nitrogen fertilization and HPS supplementary lighting influence vegetable transplant production. I. Trans-

- plant growth. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 116(4): 594-598.
18. Mitchell, C. A., T. Leakakos and T. L. Ford. 1991. Modification of yield and chlorophyll content in leaf lettuce by HPS radiation and nitrogen treatments. HortScience 26(11): 1371-1374.
 19. Park, K. W., J. H. Lee and M. H. Chiang 1994. Effects of NO_3^- -N: NH_4^+ -N ratio in nutrient solution on the growth and quality of welsh onion(*Allium fistulosum* L.). J. Bio. Fac. Env. 3(2): 99-105.
 20. 박권우, 김영식. 1992. 수경재배의 이론과 실제. 고려대학교 출판부.
 21. Rozek, S., M. Leja, J. Myczkowski and A. Mareczek. 1995. The effect of fertilization with nitrate and urea forms of nitrogen on quality and storage ability of lettuce grown in a foil tunnel. I. Content of certain nutritive compounds. Folia Horticulturae. 7(1): 91-105.
 22. Sady, W and S. Rozek. 1995. Effect of different forms of nitrogen on the quality of lettuce yield. Acta Hor. 401: 409-416.
 23. Shim, K. D. 1992. Development of a fully-controlled plant growth system. M. S. thesis. Seoul National University.
 24. 손정익, 김문기. 1992. 양액재배를 위한 배양액관리 기술시스템의 개발-1. 배양액의 배합 및 전기전도도의 예측. 생물생산시설환경학회지 1(2): 52-60.
 25. 손정익, 김문기, 남상운. 1992. 양액재배를 위한 배양액관리 기술시스템의 개발-2. 신경회로망에 의한 전기전도도의 예측. 생물생산시설환경학회지 1(2): 162-168.
 26. 손정익, 이동근, 김문기. 1993. 식물생산시스템의 다목적 재배예측 모델의 개발. 생물생산시설환경학회지 2(2): 126-135.
 27. Tremblay, N. and M. Senecal. 1988. Nitrogen and potassium in nutrient solution influence seedling growth of four vegetable species. HortScience. 23(6): 1018-1020.