

최 중
연구보고서

식물공장의 최적 배양액관리 자동화 시스템 개발

Development of Optimum Management System
of Nutrient Solution for Plant Growth
in Plant Factory

주관연구기관: 서울시립대학교

협동연구기관: 서울대학교

상명대학교

농림부행정자료실



0005421

농 림 부

최 종
연구보고서

식물공장의 최적 배양액관리 자동화 시스템 개발

Development of Optimum Management System
of Nutrient Solution for Plant Growth
in Plant Factory

주관연구기관: 서울시립대학교

협동연구기관: 서울대학교

상명대학교

농 립 부



제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 "식물공장의 최적 배양액 관리 자동화 시스템 개발"
과제의 최종보고서로 제출합니다.

2000년 12월 29일

주관연구기관명: 서울시립대학교

총괄연구책임자: 이 용 범

연 구 원: 지 성한, 이 응호

연 구 원: 한 은주, 노 미영

연 구 원: 최 기영, 조 영렬

연 구 원: 최 은영, 박 미희

연 구 원: 심 미영, 소 재우

연 구 원: 이 주현, 최 희선

협동연구기관명: 서울대학교

협동연구책임자: 이 병 일

연 구 원: 문 보흠, 이 준구

협동연구기관명: 상명대학교

협동연구책임자: 김 영식

연 구 원: 김 혜진

요 약 문

I. 제 목

식물공장의 최적 배양액 관리 자동화 시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

우리 나라 농업 기술은 1960년대 들어 현대적인 농업기술이 본격적으로 도입되었고, 1970년대 주곡인 쌀의 자급자족을 이룩한 녹색혁명, 1980년대 시설재배에 의한 원예작물의 계절성 극복, 토지이용성의 획기적인 제고, 작물재배 환경의 인위적 조절에 의한 생산성과 품질향상을 이룩한 백색혁명, 1990년대 들어서 정밀농업에 의한 작물의 획기적인 생산성 증대와 더불어 환경친화형 농업으로의 전환이 이루어져 왔다.

앞으로 21세기 농업은 작물의 생산성과 환경친화성이 높으면서 지속 가능한 농업기술이 되어야한다. 그러기 위해서 전자, 신소재, 정보통신등과 같은 주변 첨단기술이 농업에 본격적으로 이용될 것이고 결국 실질적인 정보화, 지식산업에 적합한 기술개발 체계로 전환될 것이고, 또한 농업은 환경과 농촌문화를 고려한 환경친화형 녹색기술이 중심이 될 것이다.

우리 나라 농업인구는 1970년 1400만명에서 1990년대 말에는 약 70%가 감소되어 농업인구 비율이 10%이하로 줄어들고 있으며, 청장년층의 도시 유출로 인한 농업인구의 고령화 현상(60세 이상 30%)이 심화되고 있다. 식량 자급율도 90년대 들어 급속히 낮아져 28%로 낮아지고 있는 실정이다. 우리 나라 시설원예는 원예산업이 안고 잇는 노동력 부족, 고령화, 부녀화 라는 악조건에서 4계절 신선하고 안전한 농산물 생산을 위하여 1990년 초반부터 시설면적의 급격한 증가와 시설의 현대화가 이루어지면서 재배면적도 약 50,000ha를 나타내고 있다. 수경재배 면적도 1990년까지 10ha미만이 었지만 1990년에는 648.4ha로 급속히 증가되어 왔다. 이와 같은 외형적인

생장은 뚜렷하게 나타내고 있지만 기술적인 측면에서 많은 문제점을 안고 있다.

국내 시설원예 농가의 환경 및 재배생산 수준은 노동집약적 생산시스템이 대부분으로 단위 면적당 생산성과 노동생산성이 선진국에 비해서 대단히 낮은 수준이다. 과채류에서 국내비닐하우스와 유리온실의 생산성은 유럽의 10%, 40%수준을 각각 나타내고 있고, 노동 투과량도 유럽에 비해서 1.5배 높은 실정이다. 이처럼 기존 생산시스템에서 작물생산은 환경조건(지상부, 지하부) 및 영양상태의 불균형과 공간활용효율이 낮아 작물의 잠재 생산능력발현이 한계점에 도달했다고 볼 수 있다. 따라서 시설원예에서 토지생산성과 노동생산성의 비약적인 향상을 위해서는 기존생산방식을 탈피한 고도 기술집약형인 식물공장 생산 기술 개발이 시대적 요구를 충족시킬 수 있는 새로운 기술이라고 할 수 있다. 즉, 식물공장(plant factory)이란 ‘인공환경 조건이 주어진 특수한 시설 내에서 최적 재배환경을 유지하면서 연중 균일한 품질의 식물을 생산할 수 있는 시스템’ 또는 ‘고도의 환경제어로 식물을 주년 생산하는 시스템’이라고 할 수 있다.

최근 국민소득향상에 따른 채소 소비증가와 함께 연중 신선하고 안전성을 갖춘 품질이 우수한 상추류의 수요가 급증하고 있다. 그러나 제한된 재배 면적, 부적합한 재배 환경, 인건비 상승과 농업에 대한 기피 인식 등은 소비자의 채소 수요 요구를 만족시킬 수 없을 뿐 아니라 농업의 사회적 요구도를 충족하기 위해 앞으로의 식물 생산 시스템은 자동화되는 공장적 생산 방식으로의 전환이 필요하다. 이러한 인식의 변화와 함께 미국, 네덜란드, 일본 등 선진국에서는 자동화 시설과 복합환경 제어 시스템이 구비된 환경친화적인 시설에서 작물 생산을 극대화시키는 공장적 생산 방식인 식물공장의 실용화가 이루어지고 있다. 즉 식물공장과 같은 고도 환경제어형 시설재배의 실용화는 작물의 생육 장애요인을 제거함으로써 생산성을 향상시키고, 품질 향상과 상품의 균일화와 연중계획생산을 이룩할 수 있는 것이다. 이와 같은 고도화된 작물 생산 시설에는 생육환경 자동제어 시스템이 필수적으로 요구된다. 그 중에서도 식물공장의 정상적 운영을 위해서는 작물의 최적 배양액 관리 자동화 시스템 개발이 우선된다고 볼 수 있다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

식물공장의 최적 배양액 관리 및 자동화 시스템 개발 과제에서 수행한 주요 연구내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

세부과제	연구내용
1. 식물공장용 식물의 품종선발 및 고품질 생산기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> -식물공장용 재배식물의 품종 수집 및 선발 -식물공장 유형별 식물의 고품질 생산 기술 -기능성, 고품질 채소생산 첨단관리 기술 자동화 개발
2. 식물공장 재배식물의 최적배양액 관리 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> -식물공장 엽채류 최적배양액 개발 -식물공장 재배식물의 최적 근권환경 연구 -식물공장내 환경과 생육단계에 따른 재배식물의 배양액관리 기술개발 -재배식물별 최적 양액재배 시스템 개발
3. 식물공장 재배식물의 생육 및 영양진단 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> -식물공장내 재배식물의 생리장해 및 최적 영양상태 구명 -재배식물의 영양진단 및 처방 시스템 개발 -비파괴적인 영양진단 및 처방 시스템 개발
4. 환경보존형 배양액관리 자동화 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> -식물공장내 성장환경 및 배양액 지식베이스 rule 구축 -식물공장내 성장환경 및 배양액 지식베이스 구축 -식물공장내 전문가 시스템 구축에 의한 배양액관리 시스템 개발 -환경보존형 배양액관리 체계구축 -완전폐쇄형 배양액관리 자동화시스템 개발

IV. 연구 개발결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발결과

시설원예 기술의 발전과 더불어 농업에서 첨단 재배기술이라 하면 농업기술혁신의 총아인 식물공장이라 할 수 있다. 농업과 생물공학에서 이루어진 생물학적 지식은 식물의 대량 생산시스템인 '식물공장'에서 계획적인 생산공정을 거쳐 식품을 생산하는 차세대 농업생산 시스템으로서 사회적으로도 큰 기대를 모으고 있다. 이러한 첨단기술은 주변 학문에 미치는 파급효과도 크기 때문에 선진국을 중심으로 하여 연구가 진행되어 왔고 실용화 되어가고 있는 실정이다.

그러나 그동안 자연 환경하에서 재배하던 경험과 시설내에서 환경을 제어하면서 이루어 놓은 농업기술은 어느 정도 필요한 수준에서 집대성되어 있으나 식물공장과 같이 작물에 적합한 환경을 인위적인 환경제어를 통해 최적의 환경제어기술과 작물재배 기술은 그동안의 이 분야에 대한 연구 투자가 적었던 관계로 경험도 적고 관련자료도 충분하지 않은 상태이다.

본 과제에서는 시스템화된 폐쇄된 환경하에서 작물생산과 관련된 software개발에 역점을 두고 수행하였던 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

가. 식물공장용 식물의 품종선발 및 고품질 생산 기술 개발

- 식물공장 재배식물의 수집 및 선발
- 식물공장 재배식물의 생산성, 품질 및 기능성 구명
- 식물공장내 고품질의 엽채류 재배시스템 및 재배기술 확립
- 식물공장 상추의 잎끝마름 발생기구 및 대책 확립
- 식물공장 상추의 고품질(저질산염, 고비타민C, 고Fe등)생산 기술 확립
- 식물공장 재배식물의 품질제어 모델 개발
- 공장적 대량 생산 시스템

나. 식물공장 재배식물의 최적 배양액관리 시스템 개발

- 식물공장 재배식물의 최적 배양액개발
- 식물공장 재배식물의 최적 근권환경 구명
- 식물공장의 근권내 무기이온제어 체계구축
- 식물공장내 환경, 생체정보 따른 최적 배양액 조건구명
- 생육단계, 재배환경 및 생체 정보 계측에 의한 배양액 관리 기술 확립
- 생육단계와 근권환경에 따른 배양액 관리 기술 확립
- 식물공장 재배식물 생산관리 기술 개발

다. 식물공장 재배식물의 생육 및 영양진단 시스템 개발

- 식물공장 재배식물의 생리장해 및 최적 영양상태 구명
- PC를 이용한 재배식물의 영양진단 시스템 개발
- 식물공장내 엽채류의 생육단계별 영양진단 프로그램 개발
- 식물공장내 엽채류의 생육단계별 배양액 계산 및 처방프로그램 개발
- PC를 이용한 식물공장내 상추류 생육 진단 시스템 개발
- 엽채류 생체 계측에 의한 생육 진단 기술 확립
- 엽채류 비파괴적인 영양 진단 기술 개발
- 식물공장 재배식물의 배양액 종합관리 프로그램 개발

라. 환경보존형 배양액 관리 자동화 시스템 개발

- 식물공장내 성장환경 및 배양액 지식베이스의 rule구축
- 식물공장내 성장환경 및 배양액 지식베이스 구축
- 환경보존형 배양액 관리 체계를 구축
- 환경 및 배양액 종합 관리 운영시스템 구축
- ACS^{MT} 하드웨어 및 소프트웨어 개발
- 환경보조형 배양액 관리 체계 구축
- 환경과 배양액 종합 관리 시스템 개발

2. 활용에 대한 건의

그동안 국내에서 실질적인 식물공장 시스템에서 작물재배 경험은 거의 없었다.

본과제를 수행하면서 만들어진 식물공장 시스템을 활용할 수 있는 기초 및 응용연구와 실제 운영 과정에서 연구된 많은 결과들은 앞으로 국내 식물생산 시스템을 한 단계 높이는데 필요한 software로서 사용할 수 있으리라 본다. 또한 21C 생물공학 및 원예산업의 발전은 결국 인위적인 환경 제어하에서 공간활용을 극대화하고 시설내 작업은 자동화, 기계화된 시설내에 이루어질 수밖에 없을 것이다.

이런 점을 감안하여 본과제의 연구결과를 효율적으로 이용하기 위한 방안은 다음과 같다.

- ①연구결과 보고서를 관련기관 및 개인 수요자에게 배부한다.
- ②식물공장과 관련이 있는 정부산하 연구기관 및 산업체에 연구결과를 무상 또는 유상으로 기술이전 하도록 한다.
- ③식물공장과 관련된 연구결과를 연구기관, 생산자단체, 학회 등에서 심포지움 및 세미나를 통해서 그 중요성을 알리고 활용할 수 있도록 한다.
- ④연구결과 중 산업재산권이 가능한 중요한 것들은 특허출원하고 산업체에서 유상으로 활용할 수 있도록 한다.
- ⑤시설원예, 양액재배, 조직배양, 묘생산 농가를 대상으로 필요한 교육을 주기적으로 실시한다.
- ⑥국제학회, 한국원예학회, 생물생산환경조절학회 등에 연구결과를 발표하여 많은 연구자들에게 알린다.
- ⑦가능한 1년내에 관련연구 내용을 중심으로 “식물공장 시스템과 생산관리”라는 실용서를 편찬하여 대학 및 대학원 교재로 사용할 수 있도록 하여 다음세대를 책임질 젊은 학생들에게 21C 첨단 학문분야를 준비하도록 한다.

Summary

The objectives of this research were to development the automation of optimum management system for nutrient solution in plant factory. Four sub projects were studied during five years and results as follows:

1. Culture Techniques for Production of High-quality Crops to Plant Factory Types.

For production of vegetables having higher quality and showing better growth, it is necessary to culture crops by means of hydroponics in plant factory, for it has the advantages of labor-saving, clean production, year-round production and so on.

In developing the culture system for optimum growth of water dropwort by hydroponics, growth was better in mist-spray system having medium rhizosphere volume of 40 cm depth than the others. In the system of 80 cm depth, root growth was poorer and so was top growth because of high fluctuation of rhizosphere temperature. The capacity of photosynthesis was higher in the system showing lower growth at the earlier stage, but it was not different among systems at the later stage, and appeared similar pattern in stomatal conductance.

In investigating the method of growing leaf lettuce having low nitrate and high ascorbic acid content at harvest, the growth was good in higher concentration of nutrient solution in both earlier and later stage. In low concentration of nutrient solution, mineral content was lower but in vivo nitrate content was higher than the others. Total and oxidized form ascorbic

acid contents increased to the middle stage but decreased to the later stage. Ascorbic acid content was higher in young leaves and nitrate content was decreased about 1,000 ppm than old ones.

To facilitate handling and elevate quality of leaf lettuce, root was cut to growth stages and nutrient solution was conditioned. The growth was not affected by root cutting at the early stage but decreased than control at 18 days after treatment, and uptake of nutrient elements was different by degree of root cutting. Nitrate content increased steadily and was lowest in both root cutting and nutrient solution conditioning. When soaking the root in the solution containing 500 ppm sodium L-ascorbate and depleted of nitrate, the growth and nitrate content decreased but ascorbic acid content was reverse, and it gave out a stench. Hence foliar spray of sodium L-ascorbate solution with depleting nitrate in nutrient solution was effective on elevating ascorbic acid by 3.5 times than control and lowering nitrate content in vivo. And ascorbic acid absorbed transferred to other plant site easily.

2. Controlling System with High-tech Management for Production of Functional and High-quality Vegetables.

In investigation of seasonal quality changes of water dropwort grown hydroponically, the quality was very different by sampling date. Chlorophyll and ascorbic acid content were high in summer or autumn when the growth of plants was very vigorous and the ratio of a over b in chlorophyll was high in winter. However ascorbic acid content was higher in leaves than the other plant parts, it will be healthful to eat water dropwort grown hydroponically and having many leaves compared to conventional ones in a paddy field in terms of nutritional value. In the effect of photoperiod on quality, prolonged

illumination in night with fluorescent lamp was not effective in elevating the ascorbic acid content, so it will be more beneficial to produce high quality water dropwort in natural light.

In the estimation of the growth of leaf lettuce and water dropwort, determinant coefficients of each factors were very high (over 0.9) according to cumulative daily photosynthetic photon flux density (PPFD), and it will be possible to estimate the growth with measuring the environmental factors actually. In the growth pattern of water dropwort and leaf lettuce, an inflection point appeared in PPFD about 120 and 100 $\mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. So the uptake characteristics of nutrient and water will be different to growth stages.

In the uptake pattern of nutrient solution of leaf lettuce according to PPFD, the compensation point of photosynthesis was below the density of 13.7 $\mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and the more strong was the density of PPFD, the more increase the fresh weight. The regression coefficients of fresh weight over PPFD were above 0.98 and it was proved to estimate the fresh weight to actual cumulative daily PPFD. So the equation of the model fit to estimate the fresh weight of leaf lettuce is as follows:

$$\text{FWn} = a\text{PPFm} + b\text{PPFn} + c(\text{DT})^2 + d,$$

where FWn is fresh weight in the measurement time, PPFm is (cumulative PPFD during 2 days before measurement time) \times (cumulative PPFD from transplanting day to measurement time) ($\text{mol}^2 \cdot \text{m}^{-4}$), PPFn is cumulative PPFD from transplanting day to measurement time ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$), DT is growth period (days), and a, b, c, d is coefficient of each factors, respectively.

And the optimum equation to estimate the uptake of each nutrient is as follows:

$$A_{el} = aDT + bPPF_n + cPPFP_n + dFW_n + e,$$

where A_{el} is the uptake amount during 2 days before measurement time (g), $PPFP_n$ is cumulative PPFD during 2 days before measurement time ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$), and a, b, c, d, e is the coefficient of each factors, respectively.

As a result, it will be possible to estimate the nutrient uptake on measurement time by means of the above regression equations with a computer controlling nutrient supply using actual environmental factors like PPFD or air temperature.

3. Environmental Factors in a Plant Factory Affecting Tipburn Incidence of the Lettuce.

The plant factory is a neo-plant production system that enables high quality, year-round, and planned production by controlling the environment. This study, therefore, was conducted to investigate the effect of aboveground and root-zone environmental factors on the growth and incidence of tipburn of butterhead lettuce 'Omega' and leaf lettuce 'Grand Rapids' in the plant factory.

In the plant factory with a completely controlled environment, photosynthesis of butterhead lettuce was the highest at 80% day time relative humidity (RH), regardless of night time RH, whereas it was the highest at 80%/40% day/night RH for leaf lettuce. Transpiration rates were the lowest for both lettuce at 40% day time RH. The lowest transpiration rate of butterhead lettuce at 80%/80% RH, despite the highest photosynthesis, resulted in incidence of tipburn at 100% of the plant. The Growth and relative growth rate in both lettuce were the highest at 80/80% RH, whereas leaf lettuce did not show

incidence of RH induced tipburn. Calcium contents of the inner leaves of the lettuce were higher at higher night humidity conditions. Incidence of tipburn of butterhead was observed at all treatments except for 40/80% RH, because of the high K/Ca ratio.

In the venlo greenhouse with an artificial light source, glutathione reductase (GR) activity of butterhead lettuce increased significantly at electrical conductivity (EC) of 4.5 dS m⁻¹ and 9.0 dS m⁻¹ when tipburn due to head development was observed. Root activities of both lettuce were higher at 4.5 dS m⁻¹ and 9.0 dS m⁻¹ than that at 1.5 dS m⁻¹ on the 1st day of treatment, but then they decreased over time and adapted to the high EC on the 3rd day of treatment. Ion leakage and chlorophyll content in both lettuce at 9.0 dS m⁻¹ were more than two times higher than those at 1.5 dS m⁻¹, while photosynthesis decreased. Higher incidence of tipburn was observed only in butterhead lettuce at 4.5 dS m⁻¹ and 9.0 dS m⁻¹. But there was no significant growth difference nor incidence of tipburn in leaf lettuce. Water uptake and growth of butterhead lettuce decreased with elevated EC by NaCl addition. With increasing Na content in leaves, Ca content decreased, whereas K/Ca and Mg/Ca increased.

4. Reduction of Nitrate, content Soluble Protein, Amino Acid Content, and Enzyme Activity by Nitrogen Source of Leaf Lettuce and Water Dropwort Grown with Hydroponics.

The growth of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) and water dropwort (*Oenanthe stolonifera* DC.) was better in control (NO₃⁻-N : NH₄⁺-N = 6 : 0.5 meq/L) than other treatments, while the growth was not good in (NH₄)₂SO₄. However, the growth was better in (NH₄)₂CO₃ than in NH₄NO₃. This result proposed a

possibility of using $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ as a new nitrogen source in hydroponics. When the $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ was used as nitrogen source and the pH was adjusted every 3days, growth of leaf lettuce and water dropwort was lower by 20% than currently used cultural methods. However, it was possible to produce leaf lettuce and water dropwort using $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ as nitrogen source by adjusting pH to optimum range for the crop growth, and the NO_3^- content could be reduced to $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW which was 1/10 of that in the conventional methods. Total amino acid was highest in $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ with $8-9 \text{ nM} \cdot \text{g}^{-1}$, while it was lowest in control with $1-2 \text{ nM} \cdot \text{g}^{-1}$. Soluble protein contents were $4-5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ in control and $1-2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ in $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Contents of alcohol insoluble solids, pectin, hemicellulose, and cellulose were highest in $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and lowest in control and $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

5. The Optimum Environment in Root Zone for Lettuce and Fruit Vegetables in a Plant Factory.

The result that is the development of optimum nutrient solution for lettuce and herbs is following.

Cultivars	T-N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	Micro Nutrient
	-----me/l-----					ppm
leaf lettuce(Red)	11.7	2.0	6.7	3.5	2.0	Fe-2.00
Leaf lettuce(Green)	11.1	1.8	6.7	3.1	2.0	Cu-0.05
Butterhead letuce	7.5	2.0	6.5	3.0	2.0	B-0.45
Endive	9.9	2.1	5.5	3.7	2.0	Mn-0.30
Chicory	13.0	3.0	7.2	4.0	3.0	Zn-0.30
Dill	9.4	2.1	6.2	2.8	1.7	Mo-0.05
Basil	12.8	3.6	5.8	5.8	3.0	

The result that is able to grow fruit vegetables on the optimum nutrient condition for each growing stages in a plant factory is following.

Cultivars		T-N	PO ₄ -O	K	Ca	Mg	Micro Nutrient
		-----me/l-----					
Cucumber	Vegetative						
	Growth	11.4	3.3	6.0	4.5	3.5	
	Stage						
	Reproductive						
Tomato	Growth	10.4	3.3	5.0	4.5	3.5	
	Stage						
	Seedling	13.5	3.3	7.0	7.0	3.5	
	Stage						
Perlite	Vegetative						Fe-1.500
	Growth	14.2	3.3	8.0	7.5	4.0	Cu-0.045
	Stage						B-0.350
	Reproductive						Mn-0.580
Cocopeat	Growth	10.0	3.0	7.0	6.0	3.0	Zn-0.350
	Stage						Mo-0.050
	Seedling	6.5	1.5	3.5	3.5	2.0	
	Stage						
Cocopeat	Vegetative						
	Growth	7.0	1.5	4.0	3.5	2.0	
	Stage						
	Reproductive						
Cocopeat	Growth	6.0	1.0	3.5	3.0	1.5	
	Stage						

6. Effect of Root Environmental Control on the Growth and Quality of Lettuce in Hydroponics.

This study was conducted to determine optimum root zone environment condition and proper nutrient management system for lettuce in hydroponics.

As the root zone environment condition, several range of pH, electric

conductivity(EC), temperature and dissolved oxygen of nutrient solution were treated respectively and as the nutrient control system. Four different treatments were done to the nutrient solutions - EC control (controlling EC), NPK control (controlling N, P and K nutrients), Macro control (controlling M, P, K, Ca and Mg nutrients) and Macro & Micro (controlling N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, and Zn nutrients) and the resulting growth response, photosynthetic activity and nutrient contents of plant and nutrient solution were compared.

Though all range of pH, except pH 3, from pH 4~pH 8, performed good growth without any visible physiological disorder, the optimum pH of the nutrient solution for lettuce production were pH 5.5~6.0. The optimum ionic strength of the solution were EC 1.2~1.6dS · m⁻¹ from 0.8~3.6dS · m⁻¹, because higher nutrient level caused tip burn symptom by calcium deficiency.

Twenty degree of centigrade was the optimum temperature of the nutrient solution from 10, 20, 25 and 30°C, while until 10th day after planting 25°C showed higher yield.

The highest concentration of the dissolved oxygen was best for the growth of lettuce from the range of 2 to 8 mgL⁻¹.

As the nutrient management system, Macro & Micro control was best for the growth measured as fresh weight harvest, photosynthetic activity. And this system is effective to avoid the accumulation of nutrient to toxic concentration and/or nutritional unbalance.

Considering the results above, it is concluded that lettuce can be efficiently mass-produced through the optimum root zone environment.

7. Determination of Optimum Aerial Environment for Leaf Lettuce in a Plant Factory.

For a plant factories, the optimum of the environment was required to increase mass-production efficiency of leaf lettuce with high quality. This study, therefore, was conducted to determine optimum aerial environments for leaf lettuce in a plant factory.

Optimum aerial environments for the growth and quality of leaf lettuce in the plant factory were determined to be $> 200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ for photosynthetic photo flux density (PPFD), 22/18°C(day/night) for air temperature, 60~80 % for relative humidity (RH) and 1000~2000 mg L⁻¹ for CO₂ concentration.

The interactive effect of the environmental factors such as PPFD, air temperature, RH and CO₂ concentration on the growth of the leaf lettuce showed different influences. The interaction between light intensity and nutrient level was not significant. Although the lettuce growth was the best under electrical conductivity (EC) 1.8 dS · cm⁻¹ at high light intensity (250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) and EC 2.4 dS · m⁻¹ at low light level (150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), respectively. Interaction between temperature and nutrient levels revealed that to maintain high temperature and low nutrient level was preferential for the growth of leaf lettuce compared to low temperature and high nutrient level. Although CO₂ concentration and light intensity significantly influenced the growth of leaf lettuce, their effect on the growth were not correlative. The growth of leaf lettuce was not different at the nutrient levels of the EC 1.2 ~ 4.8 dS · m⁻¹ with CO₂ enrichment.

Based on these results, it was concluded that the clean and quality leaf lettuce could be mass-produced economically and efficiently through the optimum environmental control in a plant factory. In the future, these results

will be able to be successfully used to adopt control system of growth environment for high-level horticulture production facilities or plant factories.

8. Development of a Program for Calculation and Control of Nutrient Minerals in the Plant Factory for Lettuce.

This study was conducted to determine an optimal nutrient management system for butterhead lettuce 'Omega' and leaf lettuce 'Grand Rapids' in hydroponics, and to develop a quick and reliable program for controlling the system. The composition of the USL(University of Seoul for Lettuces) nutrient solution; $\text{NO}_3\text{-N}$ 10.55, $\text{NH}_4\text{-N}$ 1.02, P 2.0, K 6.7, Ca 3.5, Mg 2.0, $\text{SO}_4\text{-S}$ 2.0 me L^{-1} , Fe 2.0, Cu 0.1, B 0.5, Mn 0.3, Zn 0.3, Mo 0.05 ppm. Four different nutrient management were done in to the nutrient solution: fill up a tank with distilled water(DW), custom management and controlling EC(CM), controlling pH and each of mineral nutrients(MN), controlling pH and mineral nutrients with leaf analysis data(ML). The main works an control creation works of calculation program based on prescriptions of standard solutions for lettuces were made by Visual Basic 5.0 and Delphi 3.0 development, respectively.

In butterhead lettuces the highest growth, CO_2 assimilation and transpiration rate and relative chlorophyll contents were in MN control, and in leaf lettuces they were in MN and ML. In EC control there were differences with calculated EC and observed EC rate. It was resulted from the concentration of organic acids, Na, Cl, SO_4 in the nutrient solution. The change in pH influenced by low concentration of nitrate was high in the control. It means that the pH should be managed in the control more than MN and ML control.

The MN and ML control improved the relationship EC and $\text{NO}_3\text{-N}$ minimizing the change of pH. In EC control $\text{NO}_3\text{-N}$ and K were maintained

without accumulation, while Ca, Mg was beyond the optimal level in the nutrient solution. In MN and ML control, there is no accumulation of cation. Especially the ML control maintained the mineral nutrients at optimal level in the butterhead lettuce and the MN control kept the mineral nutrients good condition in the leaf lettuce culture. All of them were done successfully by the quick and accurate program. The developed program could select an automatic process and passive process considering the type of fertilizers, run-off rate, density, water volume, etc for calculation.

Considering the results mentioned above, in butterhead lettuce 'Omega' the growth and the management of the nutrient solution were improved by MN control, and in leaf lettuce 'Grand Rapids' they were improved by ML control.

9. Development of Rapid Diagnostic Methods of Mineral Nutrient Level in Lettuce Plants.

The purpose of this study was to develop nutrient diagnosis methods in lettuce plant. Studies reported here were conducted to diagnosis with physiological approaches (Portable photosynthesis rate system, steady state porometer), plant fresh sap, colorimetric method, SCDS (Specific color difference sensor) in sufficient and deficient nutrient solution.

1. Physiological analysis

Lettuce yields were highly responsive to application of N, P, K, Ca and Mg. Photosynthesis and transpiration rate were quadratically related to nutrient solution, continuing to increase up to adequate nutrient level. Best-fit curved for relationship between lettuce yield and photosynthesis showed.

2. Plant fresh sap analysis

The growth was the best at standard solution. On the whole, the ionic concentrations in fresh sap were high at the high ionic solution.

3. Specific color difference sensor (SCDS) value

N, Fe and P concentrations in solution were well correlated with SCDS values. But difference in Ca and K nutrient had little relation to SCDS values.

4. Colorimetric analysis

The speed and intensity of color development were used to evaluate the N and P status of the plant.

In the venlo greenhouse with an artificial light source, treatment of excessive inorganic nutrients such as K, Mg, NH_4 , (K+Mg) and (K+Mg+ NH_4) due to Ca deficiency resulted in a radical increase of GR activity and ion leakage in both lettuce, excessive growth inhibition and 100% incidence of tipburn. Photosynthesis and growth of both lettuce were inclined to be low in inadequate ratios between Ca and other cations in nutrient solutions. Incidence of tipburn was observed only in butterhead lettuce grown in a nutrient solution that lacked Ca.

The highest ^{45}Ca accumulation of butterhead lettuce grown in the venlo greenhouse with an artificial light source was observed in the 24 hour treatment. ^{45}Ca content at the apex was 4.4 times higher than that of 25th~26th leaves, which resulted from ^{45}Ca translocation towards the apex. ^{45}Ca translocation of butterhead lettuce at 1.5 dS m^{-1} was the most active among all treatments. ^{45}Ca accumulation of upper leaves from the apex at 1.5 dS m^{-1} was 3 times higher than that at 13.5 dS m^{-1} . When treated at 9.0 dS m^{-1} , slight ^{45}Ca translocation was observed from the apex to the 5th leaf.

10. Establishment of Knowledge Bases for Growing Environment and Nutrient Solution in Plant Factory.

To establish rules for growing environment and nutrient solution, the segmented data were systematized and were mathematically converted into growing functions. The optimal environmental conditions of growth were investigated and modified to drive the rules. The cultivation rules were investigated and systematized to apply to the protected cultivation. The optimal conditions of nutrient solution were studied according to the optimal environmental conditions and its rule-base was established. To implement an automatic control system of nutrient solution, a new expert system was specified and designed. The sensors and control hardware were also specified for the automatic control. Monitoring system was basically designed.

11. Establishment of Nutrient Solution Management System by Expert System in Plant Factory.

It was designed flexible hardware system in which sensors and actuators could be successfully installed regardless of the change of their numbers and interfacing channel. The nutrient supplying system was designed to supply and drain nutrient solution automatically, irrespective of circulation types in hydroponic culture. Several development steps of the expert system were in sequence designed to establish knowledge bases for growing environment and nutrient solution. Main computer system, rack system, and current-volt conversion board were involved in the entire system.

12. Development of Nutrient Solution Management System.

We designed a real-time processing system of nutrient solution supplying control. It consisted of fuzzy relation rules of its I/O using fuzzy inference method. FIES(Fuzzy Inference Expert System), fuzzy knowledge-base expert system, was programmably connected with the nutrient solution supplying control system and the environmental control system. A fuzzy PID control method was proposed to overcome the non-linearity of plant growth. It was implemented for the purpose of making optimal nutrient-solution. Its good performance was successfully confirmed through the cultivation application in greenhouse.

13. Construction of Environmentally Conservative Nutrient Solution Management System.

The hardware system of ACSMT was configured by personal computer, sensors, interface cards and multi-ports. Its software system was programmed, using Visual C++ compiler 5.0, in Windows environment. A powerful GUI(Graphic User Interface) was designed for efficient operation. Pop-up and Pull-down Menu were simultaneously supported. The automatic controller of ACSMT consisted of a schedule controller, feedforward control algorithm, and a distributed controller, feedback control algorithm of temperature, pH and EC. The performance of ACSMT was successfully analyzed by the real cultivation.

14. Development of Automatic Control System for Multi-Tanks of Nutrient Solution.

We developed environmentally conservative nutrient solution management system whose name is ACSMT(Automatic Control System for Multi-Tanks of nutrient solution). It was registered as the program(ACSMT) for The System of Program Copyright Dispute Mediation. The most important specification of this system is that it can control nutrient solution multi-tanks simultaneously even though their compositions are different.

Contents

Chapter I. Introduction

1. Objectives and Necessity of Research 1
2. Contents and Scopes of research 3

Chapter II. Development of high quality production technology and cultivar selection in a plant factory

1. Cultivar selection and collection for plants in a plant factory 6
2. High quality production technology for a variety of plants in a plant factory 16
3. Development of controlling system of high quality production technology for vegetables 138

Chapter III. Development of controlling system for optimal nutrient solution of plants in a plant factory

1. Development of optimal nutrient solution for leaf vegetables ... 174
2. The study of optimal root environment for plants in a plant factory 256
3. Controlling technology of nutrient solution for plants on each stages an environment 280
4. Development of optimal nutrient solution system for plants 345

Chapter IV. Development of system of nutrient diagnosis and growth for plants in a plant factory	
1. Determination of optimal nutrient solution condition and physiological injury for plants	380
2. Development of diagnosis and prescription system of nutrient condition for plants	438
3. Development of diagnosis of non-destructive nutrient condition	469
 Chapter V. Development of automatic system of nutrient solution management and new materials for environmental preservation	
1. Rule construction of growing circumstances and base information of nutrient solution	495
2. Construction of growing circumstances and base information of nutrient solution	501
3. Expert system for nutrient solution	526
4. Organization of nutrient solution management for environmental preservation	535
5. Development of automatic system for nutrient solution management in closed system	563
Reference	578

목 차

제 1장 서론

제1절 연구 개발의 필요성	1
제2절 연구개발의 목적과 범위	3
제3절 본 연구와 관련된 최근의 연구동향	4

제 2장 식물공장용 식물의 품종선발 및 고품질 생산기술 개발

제 1절 식물공장용 재배식물의 품종 수집 및 선발	6
1. 재료 및 방법	7
2. 결과 및 고찰	12
3. 적요	15
제 2절 식물공장 유형별 식물의 고품질 생산 기술	16
1. 재료 및 방법	16
2. 결과 및 고찰	34
3. 적요	130
제 3절 기능성, 고품질 채소생산 첨단관리 기술 자동화 개발 ...	138
1. 재료 및 방법	138
2. 결과 및 고찰	143
3. 적요	170

제 3장. 식물공장 재배식물의 최적배양액 관리 시스템 개발	
제 1절. 식물공장 엽채류 최적배양액 개발	174
1. 재료 및 방법	174
2. 결과 및 고찰	187
3. 적요	255
제 2절 식물공장 재배식물의 최적근권환경 연구	256
1. 재료 및 방법	256
2. 결과 및 고찰	259
3. 적요	279
제 3절 식물공장내 환경과 생육단계에 따른 재배식물의 배양액 관리 기술개발	280
1. 재료 및 방법	280
2. 결과 및 고찰	287
3. 적요	343
제 4절 재배식물별 최적양액재배 시스템 개발	345
1. 재료 및 방법	345
2. 결과 및 고찰	348
3. 적요	378

제 4장. 식물공장 재배식물의 생육 및 영양진단 시스템 개발	
제 1절 식물공장내 재배식물의 생리장해 및 최적 영양상태 구명	380
1. 재료 및 방법	380
2. 결과 및 고찰	383
3. 적요	437
제 2절 재배식물의 영양진단 및 처방 시스템 개발	438
1. 재료 및 방법	438
2. 결과 및 고찰	441
3. 적요	468
제 3절 비과괴적인 영양진단 체계개발	469
1. 재료 및 방법	469
2. 결과 및 고찰	472
3. 적요	494
제 5장. 환경보존형 배양액관리 자동화 시스템 및 신소재 개발	
제1절 식물공장내 성장환경 및 배양액 지식베이스의 rule구축	
1. 재료 및 방법	495
2. 결과 및 고찰	496
3. 적요	500
제 2절 식물공장내 성장환경 및 배양액 지식베이스 구축	501
1. 재료 및 방법	501
2. 결과 및 고찰	502
3. 적요	525

제 3절 식물공장내 전문가 시스템 구축에 의한 배양액관리 시스템 개발	526
1. 재료 및 방법	526
2. 결과 및 고찰	532
3. 적요	534
제 4절 환경보존형 배양액관리 체계구축	535
1. 재료 및 방법	535
2. 결과 및 고찰	536
3. 적요	562
제 5절 완전폐쇄형 배양액 관리 자동화 시스템 개발	563
1. 재료 및 방법	563
2. 결과 및 고찰	563
3. 적요	577
참 고 문 헌	578

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 개발의 필요성

우리 나라 농업 기술은 1960년대 들어 현대적인 농업기술이 본격적으로 도입되었고, 1970년대 주곡인 쌀의 자급자족을 이룩한 녹색혁명, 1980년대 시설재배에 의한 원예작물의 계절성 극복, 토지이용성의 획기적인 재고, 작물재배 환경의 인위적 조절에 의한 생산성과 품질향상을 이룩한 백색혁명, 1990년대 들어서 정밀농업에 의한 작물의 획기적인 생산성 증대와 더불어 환경친화형 농업으로의 전환이 이루어져 왔다.

앞으로 21세기 농업은 작물의 생산성과 환경친화성이 높으면서 지속 가능한 농업기술이 되어야한다. 그러기 위해서 전자, 신소재, 정보통신등과 같은 주변 첨단기술이 농업에 본격적으로 이용될 것이고 결국 실질적인 정보화, 지식산업에 적합한 기술개발 체계로 변화될 것이고, 또한 농업은 환경과 농촌문화를 고려한 환경친화형 녹색기술이 중심이 될 것이다.

우리 나라 농업인구는 1970년 1400만명에서 1990년대 말에는 약 70%가 감소되어 농업인구 비율이 10%이하로 줄어들고 있으며, 청장년층의 도시 유출로 인한 농업인구의 고령화 현상(60세 이상 30%)이 심화되고 있다. 식량 자급율도 90년대 들어 급속히 낮아져 28%로 낮아지고 있는 실정이다. 우리 나라 시설원예는 원예산업이 안고 잇는 노동력 부족, 고령화, 부녀화 라는 약조건에서 4계절 신선하고 안전한 농산물 생산을 위하여 1990년 초반부터 시설면적의 급격한 증가와 시설의 현대화가 이루어지면서 재배면적도 약 50,000ha를 나타내고 있다. 수경재배 면적도 1990년까지 10ha미만이 었지만 1990년에는 648.4ha로 급속히 증가되어 왔다. 이와 같은 외형적인 증장은 뚜렷하게 나타내고 있지만 기술적인 측면에서 많은 문제점을 안고

있다.

국내 시설원에 농가의 환경 및 재배생산 수준은 노동집약적 생산시스템이 대부분으로 단위 면적당 생산성과 노동생산성이 선진국에 비해서 대단히 낮은 수준이다. 과채류에서 국내비닐하우스와 유리온실의 생산성은 유럽의 10%, 40%수준을 각각 나타내고 있고, 노동 투과량도 유럽에 비해서 1.5배높은 실정이다. 이처럼 기존 생산시스템에서 작물생산은 환경조건(지상부, 지하부) 및 영양상태의 불균형과 공간활용효율이 낮아 작물의 잠재생산능력발현이 한계점에 도달했다고 볼 수 있다. 따라서 시설원예에서 토지생산성과 노동생산성의 비약적인 향상을 위해서는 기존생산방식을 탈피한 고도 기술집약형인 식물공장 생산 기술 개발이 시대적 요구를 충족시킬 수 있는 새로운 기술이라고 할 수 있다. 즉, 식물공장(plant factory)이란 '인공환경 조건이 주어진 특수한 시설 내에서 최적 재배환경을 유지하면서 연중 균일한 품질의 식물을 생산할 수 있는 시스템' 또는 '고도의 환경제어로 식물을 주년 생산하는 시스템'이라고 할 수 있다.

최근 국민소득향상에 따른 채소 소비증가와 함께 연중 신선하고 안전성을 갖춘 품질이 우수한 상추류의 수요가 급증하고 있다. 그러나 제한된 재배 면적, 부적합한 재배 환경, 인건비 상승과 농업에 대한 기피 인식 등은 소비자의 채소 수요 요구를 만족시킬 수 없을 뿐 아니라 농업의 사회적 요구도를 충족하기 위해 앞으로의 식물 생산 시스템은 자동화되는 공장적 생산 방식으로의 전환이 필요하다. 이러한 인식의 변화와 함께 미국, 네덜란드, 일본 등 선진국에서는 자동화 시설과 복합환경 제어 시스템이 구비된 환경친화적인 시설에서 작물 생산을 극대화시키는 공장적 생산 방식인 식물공장의 실용화가 이루어지고 있다. 즉 식물공장과 같은 고도 환경제어형 시설재배의 실용화는 작물의 생육 장애요인을 제거함으로써 생산성을 향상시키고, 품질 향상과 상품의 균일화와 연중계획생산을 이룩할 수 있는 것이다. 이와 같은 고도화된 작물 생산 시설에는 생육환경 자동제어 시스템이 필수적으로 요구된다. 그 중에서도 식물공장의 정상적 운영을 위해서는 작물의 최적 배양액 관리 자동화 시스템 개발이 우선된다고 볼 수 있다.

제 2절 연구개발의 목적과 범위

식물공장의 최적 배양액 관리 및 자동화 시스템 개발 과제에서 수행한 주요 연구내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

세 부 과 제	연구 내 용
1. 식물공장용 식물의 품종선발 및 고품질 생산기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> -식물공장용 재배식물의 품종 수집 및 선발 -식물공장 유형별 식물의 고품질 생산 기술 -기능성, 고품질 채소생산 첨단관리 기술 자동화 개발
2. 식물공장 재배식물의 최적배양액 관리 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> -식물공장 엽채류 최적배양액 개발 -식물공장 재배식물의 최적근권환경 연구 -식물공장내 환경과 생육단계에 따른 재배식물의 배양액관리 기술개발 -재배식물별 최적양액재배 시스템 개발
3. 식물공장 재배식물의 생육 및 영양진단 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> -식물공장내 재배식물의 생리장해 및 최적 영양상태 구명 -재배식물의 영양진단 및 처방 시스템 개발 -비파괴적인 영양진단 및 처방 시스템 개발
4. 환경보존형 배양액관리 자동화 시스템 및 신소재 개발	<ul style="list-style-type: none"> -식물공장내 성장환경 및 배양액 지식베이스 시스템 구축 -식물공장내 성장환경 및 배양액 지식베이스 구축 -식물공장내 전문가 시스템 구축에 의한 배양액 관리 시스템 개발 -환경보존형 배양액관리 체계구축 -환경폐쇄형 배양액관리 자동화시스템 개발

제 3절 본 연구와 관련된 최근의 연구동향

식물공장(plant factory)이란 ‘인공환경 조건이 주어진 특수한 시설 내에서 최적 재배환경을 유지하면서 연중 균일한 품질의 식물을 생산할 수 있는 시스템’ 또는 ‘고도의 환경제어로 식물을 주년 생산하는 시스템’이라 할 수 있다. 식물공장의 시작은 북유럽에서 작물을 재배하기에 부적절한 환경인 낮은 온도와 광량때문에 1957년 덴마크에 있는 크리스텐슨(Christensen)사가 태양광과 보조광을 이용한 공장에서 콩나물과 같은 싹채소인 크레스(cress)를 재배한 것이 최초이다. 그 후 본격적인 실용화 연구는 1970년대에 인건비 상승과 토양오염 등의 환경문제가 대두되기 시작했던 미국에서 제너럴 일렉트릭(General Electric)사가 반결구 상추와 토마토 재배를 위한 식물공장을 만든 이후, 제너럴 밀(General Mills)사, 제너럴 푸드(General Foods)사 등이 완전 제어형 공장을 개발했다. 1980년대 중반 이후 일본은 전자기술을 이용한 식물공장과 우주 농업 등에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다(Park과 Kim, 1998).

국내에서는 1980년대 말부터 양액재배에 대한 관심을 가지기 시작하면서 1990년대 들어 원예시험장에서 이동형 상추재배시스템을 공장형으로 처음 만들었다. 현재는 서울시립대학교와 농진청 농업 기계화 연구소에서 소형 식물공장 시스템을 제작하여 다양한 원예작물을 대상으로 식물공장 최적 생육 환경 모델링에 관한 연구가 진행중에 있다.

앞으로의 식물공장은 양액재배의 연장선상에 있는 외부 환경 제어형을 발전시켜 종합환경 제어시스템, 생체 정보 수집 및 해석 시스템을 통해 자동화, 로봇화, 정보화 기술을 발전시켜 식물의 생체정보를 센서로 감지하여 해석, 제어하는 기술과 생명공학이 접목된 종합 시스템으로서 각 단계에서의 기술을 높여갈 것이며, 최종적으로는 묘 생산에서부터 소비자의 요구에 따라 고품질의 작물을 계획적으로 생산하는 지능화 식물공장으로 발전되어

갈 것이다.

식물공장에 관한 연구는 품종선발, 광원, 환경요인, 생육 진단 및 생장 해석 등을 중심으로 이루어져 왔다. Nonami 등(1991a)은 식물 생장을 제어할 때 지표로 배양액의 전기전도도(electrical conductivity: EC) 대신 양액과 식물체의 수분 포텐셜을 측정하여 배양액의 농도가 변할 때 식물과 수분과의 관계를 알아보았으며, Cho 등(1998)은 완전제어형 식물공장에서 인공광원에 따른 결구 상추의 생육은 차이가 없었으나 생육과 경제성을 고려하면 고압나트륨등을 사용하는 것이 좋다고 하였다. 이와 같은 인공광원에 관한 실험은 Craker와 Seibert(1982), Goto와 Takakura(1988), Ikeda 등(1992), Park 등(1992), Tibbitts 등(1983) 등에 의해 연구되었으며, 인공광재배 시스템에서의 광도, 광주기, 암기중 광 비율, 스펙트럼 분산과 같은 광 조사 조건은 폭넓게 변화될 수 있다. 또한 컴퓨터를 이용한 환경제어 장치의 개발(Okano 등, 1988; Tantau, 1993), 생장모델과 제어(Hong, 1995; Lee, 1990; Shibata 등, 1993; Takatsuji, 1993)과 폐쇄생태계에서의 생명유지시스템(Closed Ecological Life Support System: CELSS)에서의 식물생산(Tani, 1997) 등이 연구되고 있다. 또한 micropropagation을 바탕으로한 묘 생산 식물공장에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며(Hayashi 등, 1993; Kubota 등, 1997), Han(1998)은 기내 생산된 국화의 조직배양묘와 양액재배를 결합시킨 microponic system을 확립하여 대량생산을 위한 식물공장내 최적환경에 관한 연구를 하였다.

제 2 장 식물공장용 식물의 품종선발 및 고품질 생산기술 개발

현대사회에서는 대기오염이나 수질오염 등의 환경공해로부터 벗어나기 힘들고 국민소득의 증가로 먹거리의 중요성도 증대하고 있어, 깨끗하고 질이 높은 채소의 공급은 매우 중요하다고 할 수 있다.

최근 부각되고 있는 엽채류의 품질로는 tipburn 발생 억제, 체내 질산태질소 oxalate, 비타민 C 및 selenium등을 들 수 있다. 연구들을 보면 양액재배를 통한 엽채류의 질산태 질소 함량을 줄이는 연구는 많이 이루어지고 있으며, 서금치에서 oxalate 함량을 환경제어나 유전적인 요소를 찾아 유용 유전자를 도입하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.(藤井 等, 1994). 또한 비타민 B₁₂(吉田 等, 1998), E, biotin등 비타민류와 철 및 Se의 증대를 피하고자 하는 보고가 많다. 특히 ascorbic acid함량 증대에 있어서는 소송채, 피망, 토마토, 상추 및 무 등 대부분의 채소류에서 연구가 이루어지고 있고, 특히 시설재배시 일정농도의 양액에 뿌리를 침치하여 그 함량을 증대시키고자 하는 보고도 있다. 질산태질소는 유럽에서 이미 채소류의 생산시 규제되고 있는 성분이며 일정 양 이상 함유되어 있는 채소는 수출과 수입이 금지되어 이를 낮추기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

따라서 식물공장적 생산방식에서 식물공장 환경에 적합한 품종 선발, 엽채류 품질을 좌우하는 tipburn 발생 기작과 대책에 대해서 연구를 수행하였으며, 또한 상추의 비타민 C와 Fe함량을 증대시키고 질산태 질소 함량을 저감시키는 생산 시스템을 체계화하기 위해 수행되었다. 그리고 양액재배시 쉽게 도장하기 때문에 물리적인 스트레스를 부여하고, 수확전 일정기간 양액의 조정(conditioning of nutrient solution)과 sodium ascorbate 처리를 통해 체내 질산태 질소와 비타민 C 함량에 미치는 영향을 알아보았다.

제 1 절 식물공장용 재배식물의 품종 수집 및 선발

1. 재료 및 방법

식물 공장은 다비성과 고밀도 제어 시스템 등 고에너지 투입에 따른 기존 재배 환경과는 많은 차이점을 갖는다. 이러한 식물공장에서 적합한 품종의 수집 및 선발을 목표로 한다.

식물공장에 적합한 품종 선발 시 이용된 실험 시설은 다음과 같다.

대 학	식물공장 형태	면 적
서울대	· 태양광 이용형	250m ²
	· 인공광 병용형	100m ²
서울시립대	· 태양광 이용형	450m ²
	· 인공광 병용형	300m ²
	· 완전제어형	30m ²
	· 완전제어형	4m ² ×4set
	· Phytotron	1.2m ² ×4set
	· Growth chamber	

식물공장에 적용시킬 수 있는 엽채류 중심으로 작물을 선정하였다. '96년도에 수집한 작물은 잎상추, 반결구상추, 결구상추, 엔다이브, 치커리 등 이었다. 이들 재배식물들은 1차적으로 식물공장 환경적응성과 생태적 특성을 고려하여 품종선발을 하였다.

'97년도에는 이러한 특성을 고려하여 선발된 식물과 품종을 중심으로 생산성과 품질에 주안점을 두고 실험하였다.

수집된 품종은 다음과 같다.

가. 잎상추 품종 수집

-불꽃측면상추 외 31종

과종번호	품	종	회 사 명
101	청치마상추		홍농종묘
102	적치마상추		홍농종묘
103	뚝섬적측면상추		홍농종묘
104	불꽃측면상추		중앙종묘
105	뚝섬청측면상추		홍농종묘
106	청측면 (Green Wave)		중앙종묘
107	청측면 (Grand Rapid)		중앙종묘
108	주홍적측면상추		중앙종묘
109	여름청측면상추		중앙종묘
110	Lollo Rossa		Van Hemert & Co. B.V.
111	Frisbysla		Van Hemert & Co. B.V.
112	Red Salad Bowl, Loosehead		Tuinplus
113	Frisée D'amérique, curled loosehead		Tuinplus
114	Royal Frillice		Royal Sluis
115	Lollo Rossa Atsina		Royal Sluis
116	Red Salad Bowl		Royal Sluis
117	Colorado RZ		Rijk Zwaan
118	Lollo Bionda-Brigida RZ		Rijk Zwaan
119	Pippo RZ		Rijk Zwaan
120	Sesam RZ		Rijk Zwaan
121	Curly lettuce outdoor Krico RZ		Rijk Zwaan
122	Curly lettuce outdoor Krizet R Z		Rijk Zwaan
123	Curly lettuce outdoor Raisa RZ		Rijk Zwaan
124	Curly lettuce-Novita		Leen de Mos
125	Lollo Bionda Cireo		Leen de Mos
126	Impuls		Leen de Mos
127	Sunburst		Leen de Mos
128	Sherpa EZ		Enza Zaden BV.
129	Lollo Bionda Lobi EZ		Enza Zaden BV.
130	Terra EZ (red)		Enza Zaden BV.
131	Samantha EZ (red)		Enza Zaden BV.
132	Grand Rapid		경신종묘

나. 반결구 상추 품종 수집

- Omega 외 63종

과종번호	품	종	회 사 명
201	시료 L-6		Mikado 종묘
202	サラダ菜		ウタネ 종묘
203	岡山サラダ菜		タキイ 종묘
204	반결구상추		중앙종묘
205	Zwart Duits		Van Hemert & Co. B.V.
206	Hilde, White Boston or Attraction impr.		Tuinplus
207	Cindy		Van Hemert & Co. B.V.
208	Salina		Van Hemert & Co. B.V.
209	All The Year Round		Royal Sluis
210	Vnrivalled		Royal Sluis
211	May King		Royal Sluis
212	Oresto		Royal Sluis
213	Vnrivalled		Symphonie
214	TUBA		Tuinplus
215	Attractie, Verbeterde		Van Hemert & Co. B.V.
216	Renania (E 2635)		
217	Hilde(D 2615), White Boston or Attraction impr.		
218	Attractie (1410)		Fleurmerc BV.
219	Clarion (K 2621)		Horti Tops
220	Indoor Butterhead Lettuce Maestro RZ		Rijk Zwaan
221	Indoor Butterhead Lettuce Omega RZ		Rijk Zwaan
222	Outdoor Butterh. Lettuce Arizona RZ		Rijk Zwaan
223	Outdoor Butterh. Lettuce Balisto RZ		Rijk Zwaan
224	Outdoor Butterh. Lettuce Elvira RZ		Rijk Zwaan
225	Outdoor Butterh. Lettuce Lutetia RZ		Rijk Zwaan
226	Outdoor Butterh. Lettuce Mephisto RZ		Rijk Zwaan
227	Outdoor Butterh. Lettuce Walter RZ		Rijk Zwaan
228	Lettuce-Jory		Leen de Mos
229	Lettuce-Cortina		Leen de Mos
230	Lettuce-Luxor		Leen de Mos
231	Lettuce-Ragoda		Leen de Mos
232	Lettuce-Elvis		Leen de Mos
233	Lettuce-Claret		Leen de Mos
234	Lettuce-Isaac		Leen de Mos
235	Lettuce-Maurice		Leen de Mos
236	Lettuce-Elisabeth (6029)		Leen de Mos
237	Lettuce-Eduaro		Leen de Mos
238	Lettuce-Rarcival		Leen de Mos
239	Lettuce-Prior		Leen de Mos
240	Lettuce-Batavia-Davinia		Leen de Mos

과종번호	품	종	회 사 명
241	Lettuce-Little Gem	Ferro	Leen de Mos
242	Outdoor Lettuce	Stephanie EZ	Enza Zaden BV.
243	Outdoor Lettuce	Mini EZ	Enza Zaden BV.
244	Outdoor Lettuce	Prosper EZ	Enza Zaden BV.
245	Outdoor Lettuce	Clarion EZ	Enza Zaden BV.
246	Outdoor Lettuce	Daphne EZ	Enza Zaden BV.
247	Outdoor Lettuce	Ovation EZ	Enza Zaden BV.
248	Outdoor Lettuce	Thirza EZ	Enza Zaden BV.
249	Outdoor Lettuce	Enya EZ	Enza Zaden BV.
250	Outdoor Lettuce	Fleur EZ	Enza Zaden BV.
251	Outdoor Lettuce	Senaria EZ	Enza Zaden BV.
252	Outdoor Lettuce (red)	Bacardi EZ	Enza Zaden BV.
253	Outdoor Lettuce (red)		Enza Zaden BV.
	Merv. des 4 Saisons	Chaperon EZ	
254	Glasshouse Lettuce	Cristel EZ	Enza Zaden BV.
255	Outdoor Lettuce type	Batavia	Enza Zaden BV.
	Doree de Printemps	Albena EZ	
256	Outdoor Lettuce type	Batavia	Enza Zaden BV.
	Vanity	EZ	
257	Salvo		Bruinsma
258	Santiago		Bruinsma
259	Omero		Bruinsma
260	Meikoningin		Van Hemert & Co. B.V.
261	Wonder der vier jaargetijden		Van Hemert & Co. B.V.
262	Amerikaanse Roodrand		Van Hemert & Co. B.V.
263	Rosa Pablo		Royal Sluis
264	May Queen (2610)		Tuinplus

다. 엔다이브 품종 수집

- President 외 15종

과종번호	품	종	회 사 명
401	Number Five		Fleurmerc BV.
402	White curled		
403	President		Van Hemert & Co. B.V.
404	Number Five 2-Bruno		Fleurmerc BV
405	Breedblad Volhart Winter		Van Hemert & Co. B.V.
406	Number Five 2-malan		Royal Sluis
407	Avante Grade Winter		
408	Number Five-Player		Leen de Mos
409	Tres Fine Marajcher Lindo		Leen de Mos
410	Wallonne Remix		Leen de Mos
411	Geante Marajcher Matisse		Leen de Mos
412	Number Five 2-Stratego		Rijk Zwaan
413	Priscilla		Rijk Zwaan
414	Tres fine Mar.-Oxalie		Rijk Zwaan
415	Wallonne-Cosma		Rijk Zwaan
416	Number Five 2		Bruinsma

라. 기타 (치커리, 결구상추, Cos Lettuce) 품종 수집

종 류	과종번호	품	종	회 사 명	
치 커 리	601	Palla Rossa		Flora Frey	
	301	Great Lakes 659		Symphonie	
	302	Ice Lettuce Nabucco		Royal Sluis	
	303	Melbourne RZ		Rijk Zwaan	
	304	Murillo RZ		Rijk Zwaan	
	305	Roxette RZ		Rijk Zwaan	
	306	Saladin RZ		Rijk Zwaan	
	결구상추	307	Saladin-Quick RZ		Rijk Zwaan
		308	Saladin-Sevilla RZ		Rijk Zwaan
		309	Globe		Leen de Mos
		310	시료 L-5		Mikado 종묘
		311	Ontario		Sakata Seed
		312	Salinas-88		Sakata Seed
313		M-WRAP-231		Sakata Seed	
Cos Lettuce	501	Oakleaf Lettuce-Ferrari		Leen de Mos	
	502	Junior RZ		Rijk Zwaan	
	503	Tiberius RZ		Rijk Zwaan	
	504	Valmaine Manavert EZ		Enza Zaden BV.	

2. 결과 및 고찰

수집된 품종들의 양액재배 적응성 및 식물공장하에서의 식물형태 조사결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 잎상추 품종선발

양액재배 적응성		식물공장하에서 식물형태				
양호	불량	극히 양호	양호	보통	불량	극히불량
101~113 115~132	114	104, 109, 116, 121, 123, 125, 126, 129, 131	103, 105, 106, 107, 110, 111, 112, 115, 117, 118, 124, 127,	101, 102, 113, 119, 120, 122, 130, 132	114	

(2) 반결구상추 품종선발

양액재배 적응성		식물공장하에서 식물형태				
양호	불량	극히 양호	양호	보통	불량	극히불량
202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 220, 221, 222, 223, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 263	201, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 225, 226, 227, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 257	204, 208, 220, 221, 229, 230, 231, 232, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 241, 255, 256, 258, 259, 264	228, 233, 261, 262, 263	202, 203, 205, 206, 207, 222, 223, 240, 257, 260	210, 211, 212, 213, 214, 216, 249	209, 215, 217, 218, 225, 226, 227, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 250, 251, 252, 253, 257

(3) 엔다이브 품종선발

양액재배 적응성		식물공장하에서 식물형태				
양호	불량	극히 양호	양호	보통	불량	극히불량
401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 410, 411, 412, 413, 415, 416	409, 414	401, 403, 408, 413, 415	402, 404, 405, 406, 407, 410, 411, 412, 416	409, 414		

(4) 식물종류별 고온 장일조건에 대한 적응성

식물종류	추			대		
	NB	R	MR	MS	S	VS
잎상추		101, 104, 109, 111, 114, 115, 130	110, 115, 117, 118, 120	119, 125, 126, 127, 129	103, 106, 107, 108, 112, 116, 121, 122, 123, 131	102, 105, 113, 124, 132
반결구상추		201, 204, 208, 221, 223, 229, 232, 256, 258, 259	202, 203, 206, 217, 223, 220, 228, 230, 233, 239, 242, 254, 255, 263, 264	210, 214, 215, 218, 219, 225, 227, 240, 241, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251	205, 207, 209, 212, 213, 216, 222, 224, 226, 231, 234, 235, 236, 237, 238, 243, 252, 253, 260, 262	211, 257, 261
Cos Lettuce		503	504	501, 502		
Endive	401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416					

NB : No bolting, R : Resistance to bolting, S : Sensitive to bolting

마. 선발 식물의 공장적 생산 가능성 선택

선발 작물 및 품종에 대한 공장 생산 가능성과 그 효율을 높이기 위한 연구를 완전제어형 식물공장과 태양광 병용형 식물공장에서 수행되었다.

식물공장에서 재배가능한 작물의 작물성장률(CGR)은 잎상추 0.35~0.45, 반결구상추 0.31~0.40, 백경채 0.41~0.53, 엔다이브 0.26~0.36, 케일 0.46~0.59, 허브(바실과 딜) 0.25~4.1g · m⁻² · day⁻¹를 나타냈으며, 연간 회전율은 잎상추, 반결구상추, 백경채 등이 다른 작물에 비해 높아 15~20회를 나타냈다.

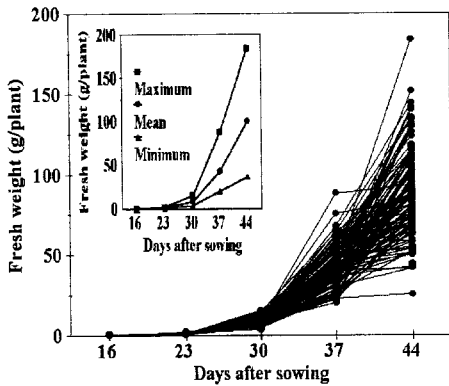


Fig 2-1. 반결구상추 생육량 변화

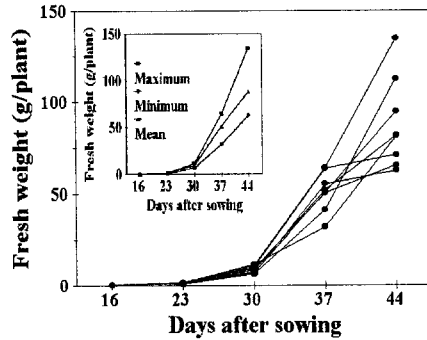


Fig 2-2. Cos lettuce 생육량 변화

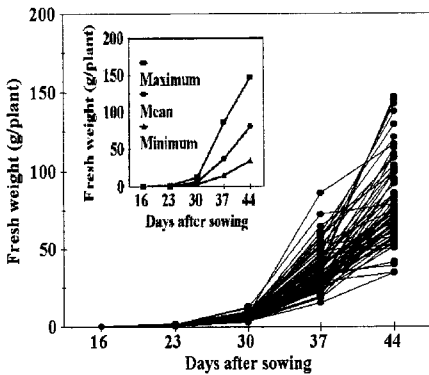


Fig 2-3. 잎상추 생육량 변화

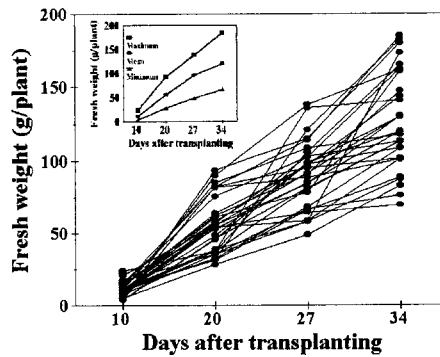


Fig 2-4. 엔다이브 생육량 변화

3. 적요

엽채류 식물공장 재배에 적합한 작물 및 품종을 9개국으로부터 12작물 160품종을 수집하였다.

식물공장에서 적용 가능성이 높은 작물 평가는 환경적응성(저광, 장일, 추대, 근권온도, 고습도, 고CO₂), 품질(Tipburn, 외관, 비타민 A, C함량, 질산염함량, 무기물함량, 향), 기능성(Ca, Fe, Se, Ge, 저질산염, 고비타민 함량), 성장속도, 형태적 특성(재식밀도:직립형), 양액재배조건에 대한 적응성 등을 고려할 때, 잎상추중에서 청축면, 적축면, Lollo Rossa 등 8계통, 반결구 상추에서 Omega, Maestro, 강산사라다채 등 20계통, 엔다이브에서 President 외 5계통, 차커리에서 Palla Rossa 외 2계통, Cos Lettuce에서 Junior외 2계통, 미나리 보성재래외 4계통 등이었다.

제 2절 식물공장 유형별 식물의 고품질 생산기술

1. 재료 및 방법

가. 미나리 주년 생산을 위한 적정 수경재배 시스템 개발

양액 공급시의 pH와 EC는 각각 6.5와 $1.60\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 로 생육 전반에 걸쳐 별도로 보정하지는 않았으며, 처리후 매일 소량 채취하여 pH meter(HI8284, Hanna instruments)와 conductivity meter(HI8733, 동회사)를 이용하여 각각 측정하였다. 각 재배상내의 온도와 상대습도는 CR10X data logger(Campbell Sci.)를 이용하여 매일 30분 간격으로 수집하였다. 공시한 미나리의 일장은 18:00부터 23:30까지 각 베드당 60W 백열등을 수관부위 1m 높이에 설치하여 일일 16시간의 장일조건이 되도록 하였다.

양액재배상은 $60 \times 50\text{cm}$ styrofoam 정식판 3장을 놓을 수 있도록 제작하여 식물체 이외의 수분 증발량을 최소화할 수 있도록 설계하였으며, 담액처리구(Deep-flow)는 뿌리가 양액에 3cm 및 7cm 잠기도록 수위를 조절하였고, 분무처리구(Mist-spray)는 점적관을 재배상 내에 설치하여 정식판 바로 10cm 아래에서 양액이 분무되도록 하였는데 재배조 깊이를 40 및 80cm로 하여 완전임의배치 3반복 처리하였다.

모든 양액의 여액은 다시 양액조로 흘러들어와 펌프를 이용한 지속적인 순환이 가능하도록 하였다. 양액의 순환 조건은 분무처리구에서 06:00부터 11:00까지는 30/15분(순환/정지)으로, 11:00부터 18:00까지는 45/30분(순환/정지), 그 외 시간은 15/45분(순환/정지)이 되도록 하였다. 또한 담액처리구는 공히 15/15분 순환과 정지를 반복하도록 하였다.

양액 조성은 정식 후 매 5일마다 채취하여 측정하였으며, K, Mg 및 Ca는 일정량 희석한 후 atomic absorption spectrophotometry(AA6401, Shimadzu Corp.)를

이용하여 분석하였다. 그리고 $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 indophenol-blue 법(植物榮養實驗法編集委員會, 1990)으로, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 Cataldo 법(Cataldo 等, 1975)으로, $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 vanadate 법(농촌진흥청 농업기술연구소, 1988)에 의한 비색법으로 Shimadzu UV-1601 UV-VIS spectrophotometer를 이용하여 각각 665, 410 및 470nm에서 측정하여 정량하였다.

식물체 생육은 처리후 6일, 16일, 26일째에 기초생육과 근권부 생육을 조사하였고, 실험 종료일에 각 9반복씩 채취하여 전질소, K, Ca, Mg 및 $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 양액의 분석법과 동일하게 하였는데, 양액 대신 $\text{HClO}_4\text{:H}_2\text{SO}_4\text{:H}_2\text{O}=90\text{:}5\text{:}55$ 의 비율로 섞은 분해액으로 습식분해하여 일정량 회석한 후 분석에 사용하였다.

미나리 체내 엽록소 함량은 제 2신엽에서 생체중으로 0.5g을 채취하여 100% ethanol로 24시간 암상태에서 추출한 후 3배 회석하여 649 및 665nm에서 비색 측정 후 그 함량을 계산하였다(牛島 等, 1981).

그리고 미나리 잎에서의 광합성 효율은 LI-6400 portable photosynthesis system(LI-COR)을 이용하여 측정하였는데, 정식 후 10일째에는 자연 조건(온실 내)에서, 수확시(25일째)에는 실내에서 엽온 25°C , 조도 $2000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 수준으로 조사하여 측정하였다.

나. 공장생산을 통한 품질향상 체계 연구

1) 생육단계별 양액 농도구명

서울대학교 농업생명과학대학 부속농장에 위치한 유리온실에서 전년도(1998년)에 구명된 생육단계별 상추양액 농도를 밝히기 위해 실험을 수행되었다.

상추 Yamazaki 처방액으로 재배하여 생육 단계별로 나타난 배양액 조성은 생육 초기(0~10 days after transplanting, DAT)에 $\text{NO}_3\text{-N}$ 6.0, K 2.5, Ca 3.0, Mg 1.0 및 $\text{PO}_4\text{-P}$ $1.0\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$ 이었으며, 생육중기(11~20 DAT)에 $\text{NO}_3\text{-N}$ 12.5, K 6.5, Ca 2.5, Mg 0.6 및 $\text{PO}_4\text{-P}$ $3.5\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 나타났다. 사용한 Yamazaki 처방액의 조성은 NO_3^- 6.0, K 4.0, Ca 2.0, Mg 1.0 및 P $1.5\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$ 였다.

유리온실에서 파종후 26일된 상추(서울종묘, 청치마)를 베드(150×60cm)당 32개 체씩 6베드를 정식하였고, 100L의 양액을 간헐식(2/2min, on/off)으로 공급하였다. 양액의 수위는 8.5cm로 일정하게 유지하였다.

정식 후 12일째까지 위의 생육초기 양액조성으로 0.5, 1.0 및 1.5배 농도로 각 베드별로 양액을 100L씩 공급하여 주었고, 나머지 3 베드에는 처음부터 Yamazaki 처방액으로 공급하다 13일째부터 생육후기의 조성으로 그 농도를 각각 0.5, 1.0 및 1.5배로 조정하여 공급하였다.

12일째와 24일째 각 처리별로 생육량, 양액의 농도 및 감모량을 측정하여 각 원소별 n/w 값을 계산하였다.

2) 생육단계별 체내 질산태질소와 비타민 C 함량의 변화

생육전기에 양액 농도를 낮게 한 후 생육중기부터 농도를 높여 재배한 상추와 생육기간 동안 Yamazaki 처방액으로 재배한 상추에서 ascorbic acid 함량과 질산태질소 함량의 변화를 살펴보았다.

1998년 12월 18일 폴리우레탄 스폰지에 파종하여 발아시킨 상추(서울종묘, 청치마)를 본엽이 2매 전개하였을 때 Yamazaki 배양액 2/3 농도로 양액을 공급하여 cell 당 1개체씩 숙아주고, 1999년 1월 16일 베드당 32개체씩 정식하였다. 양액은 100L였으며, 매 3일마다 6개체씩 채취하여 3개체는 생육량을 조사하고 나머지 3개체는 ascorbic acid 분석에 사용하였다.

정식 후 12일째까지 0.5배액으로 재배하다가 이후 24일째까지 1배액으로 재배한 양액대체구와 처음부터 수확시까지 Yamazaki 조성액으로 재배구를 설치하여 비교하였다. 양액 대체구의 생육전기 조성은 NO_3^- 4.0, K 1.25, Ca 1.5, Mg 0.5 및 P $0.5\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ 였으며 생육후기 조성은 NO_3^- 8.0, K 6.0, Ca 2.0, Mg 1.0 및 P $1.5\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ 이었다.

기상조건은 CR-10X(Campbell Scientific, Inc.)로 수집하였고, 양액과 식물체의 질산태질소는 Cataldo법으로, ascorbic acid 함량은 2,4-DNP 법으로 분석하였고, K, Ca, Mg, P는 Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer (ICPS-1000IV, Shimadzu)로 분석하였다.

3) 상추 단근과 양액농도에 따른 체내 ascorbic acid 및 질산태질소 함량의 변화

뿌리의 절단을 통해 스트레스를 부여하여 지상부 생육을 효과적으로 억제할 수 있는 가능성과 체내 성분 변화에 미치는 영향을 살펴보았다.

1999년 1월 27일 파종한 상추를 본엽 2매시에 cell 당 1개체만 남기고 나머지는 슈아주고 양액을 공급(Yamazaki, 2/3S)하였으며, 2월 25일 베드당 32개체씩 정식하였다.

뿌리는 정식 후 18일째까지 3일 간격으로 지재부로부터 5.0cm 이하는 잘라주었으며(강단근), 정식 후 12일째까지는 정상적으로 재배하다 1회 5.0cm로 절단(약단근)하였다. 그리고 각각의 처리에 양액을 Yamazaki 처방액으로 계속 공급한 처리구와 정식 후 12일째까지는 저농도로, 이후부터 18일째까지 고농도로 재배한 처리구를 배치하였다.

공급한 양액량은 100L였으며, 수위는 정식 후 6일째까지 8.5cm를 유지하다 이후에는 정식판 아래로 2.5cm 공간을 두었다. 이때 단근처리구의 뿌리는 절단면으로부터 2.5cm는 양액에 잠기도록 하였다.

정식시와 6, 12 및 18일째 식물체를 채취하여 ascorbic acid를 분석(2,4-DNP법)하였고, 생육량과 질산태질소(Cataldo 법) 함량과 농도를 조사하였다.

4) 수확전 양액 조정에 따른 질산태질소 저감과 ascorbic acid 함량 증대

온실 내에서 일정기간 정상적으로 생육시킨 다음 수확전 일정 기간동안 양액의 조정을 통해 고품질 채소를 생산하기 위한 가능성을 검토하기 위해 실시하였다.

파종 후 25일된 상추를 1999년 4월 6일 각 베드 당 총 30개체씩 정식하였다. 정식 후 14일째까지 Yamazaki 조성에 KNO_3 $2.0\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ 가 추가된 양액으로 재배하다 양액을 3일간 조정하였다.

조정용 양액(conditioning soln.)으로는 4가지 처리를 하였는데, DW는 증류수에

KCl 6.0, CaCl₂ 2.0, KH₂PO₄ 1.5, MgSO₄ 1.0me · L⁻¹ 및 Fe과 미량원소를 넣었다. TW, A 처리는 수돗물에 위 조성과 동일하게 넣어 준 다음 sodium L-ascorbate를 500ppm이 되도록 하였다. TW, B처리로는 수돗물에 양액을 넣은 다음 sodium L-ascorbate를 500ppm 처리하였다. 대조구로 양액에 sodium ascorbate를 넣지 않은 것으로 설정하였다. 모든 처리의 최종 용액부피는 5L로 하였다.

정식 후 14일째와 17일째 채취하여 생육과 질산태질소 및 ascorbic acid 함량을 계산하였다.

5) 양액조정에 따른 sodium ascorbate의 엽면시비 효과

본엽 5매 정도의 상추를 25L용 플라스틱 사각용기에 6개체씩 정식하여 15일간 Yamazaki 처방액에 KNO₃가 2me · L⁻¹ 추가된 양액으로 재배하였다. 양액은 20L씩 공급하였으며, 용존산소 농도를 높이기 위해 air stone으로 연속적으로 bubbling을 하였다. 15일째부터 3일간 양액 갱신 없이 같은 양액으로 계속 재배한 대조구(Control)와 여기에 sodium ascorbate 1,500(A) 및 3,000ppm(D) 엽면시비한 처리구, 위 양액조성 중 NO₃만 Cl로 전부 대체하고 sodium ascorbate 1,500ppm 엽면살포한 양액조정구(B), 증류수에 sodium ascorbate 1,500ppm이 되도록 하여 뿌리를 침지하는 처리구(C) 등을 배치하였다. 양액이나 용액의 양은 10L로 하였다.

또 질소수준별로 수확시 상추의 엽중 ascorbic acid 함량을 알아보기 위해 9월 23일 베드당 12개체씩 정식하고 양액을 100L로 공급하여 질소를 3수준으로 설정하였고 그 조성은 Table 2-1과 같다.

Table 2-1. The composition of nutrient solution used in experiment.

Treatment	NO ₃ ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	PO ₄ ³⁻
			<i>me · L⁻¹</i>		
N-4	4 ^z	6	2	1	1.5
N-8	8	4	2	1	1.5
N-12	12	4	2	1	1.5
Control	6	6	2	1	1.5

^z The lacking amounts was supplied as NaNO₃.

6) Sodium ascorbate의 처리시기와 농도가 상추 품질에 미치는 영향

본엽 6매 내외의 상추를 베드당 18개체씩 정식하였다. 양액은 100L를 1분 간격으로 공급하였고, 조성은 NO₃-N 8.0, K 6.0, Ca 2.0, Mg 1.0 및 PO₄-P 1.5me · L⁻¹였다. 양액의 높이는 8.5cm로 일정하게 유지하였다.

정식후 20일째 엽장이 10cm 이상인 시장성 잎이 7매 정도로 남기고 먼저 나온 잎들을 제거하였다. 9개체씩 남은 잎들 앞 뒤로 09:00, 14:00 및 20:30에 3,000ppm sodium ascorbate 500mL을 고루 분무하여 주었으며, 1일 뒤 엽 중 질산태질소와 ascorbic acid 함량을 분석하였다.

한편 처리 농도별 영향을 알아보기 위하여 9월 23일 정식한 상추를 위의 양액 조성으로 재배한 뒤 20일째 sodium ascorbate로써 2,500, 5,000 및 10,000ppm을 5개체 잎의 앞 뒤로 고루 살포하여 주었다. 또 살포한 ascorbic acid의 이동성을 보기 위해 같은 개체의 1, 3, 5, 6, 8, 10, 12, 13, 15, 17 및 19번째 나온 잎들 앞 뒷면에 5,000ppm을 고루 분사하여 1일 뒤 엽중 함량을 분석하였다.

질산태질소는 Cataldo법으로, ascorbic acid 함량은 HPLC(Spectrasystem, P2000)로 Zapata 등(1992)의 방법을 변형하여 분석하였고 조건은 Table 2-2와 같다.

Table 2-2. The conditions of HPLC used in ascorbic acid analysis of lettuce.

Specification	Conditions
HPLC model	Spectrasystem, P 2000
Column	μ -bondapak
Integrator	Thermo Separation Products
Mobile phase	50mM CTAB and 50mM KH_2PO_4 in 5% methanol
Flow rate	1.5 mL/min.
Detector	UV-detector (DHAA 348, AA 261nm)
Extraction buffer	Citric acid (0.1M) and EDTA (0.05%) in 5% methanol

다. 식물공장 엽채류 질산염(NO_3)함량 저하 기술

1) 상추 및 미나리 질산염(NO_3)함량 저하 기술

‘양주 지방종’ 미나리와 ‘뚝섬 청숙면’ 상추를 유리 온실내에서 수행되었다.

두 작물 모두 담액수경 방식으로 30일간 재배한 후 수확하였는데, 사용한 양액의 표준 조성은 $\text{NO}_3\text{-N}$ 6, $\text{NH}_4\text{-N}$ 0.5, P 2, K4, Ca 2 및 Mg 1meq $\cdot \text{L}^{-1}$ 였고, 양액의 pH는 3일에 1회씩 측정하여 조절하였다. 식물체의 NO_3 함량은 NO_3 전극를, 질산환원효소(NR:Nitrate Reductase)의 활성은 Kaiser와 Lewis(1983)의 방법을 이용하여 각각 분석하였다.

질소 급원으로는 NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 및 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 를 각각 이용하였는데 (Table 2-3), 전체 질소의 농도를 6.5 meq $\cdot \text{L}^{-1}$ 로 고정시킨 채 각기 한가지 비료 염을 이용하였기 때문에, 처리에 따라 Cl, S 및 CO_3 이 양액에 첨가되어 불가피하게 이들의 농도가 표준액에 비하여 5-6, 5meq $\cdot \text{L}^{-1}$ 까지 높아졌다.

Table 2-3. Concentration of counter ion of each nitrogen source.

Nitrogen source	Counter ion	Concentration (meq $\cdot \text{L}^{-1}$)
NH_4NO_3	Cl	5.0
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	S	6.5
$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	CO_3	6.5

식물체의 NO_3^- 함량을 낮출 수 있는 방법간의 효율을 비교하기 위해서 식물체의 NO_3^- 함량이 낮으면서도 작물의 생육이 비교적 좋았던 처리들, 즉 1me/l의 NH_4OH 를 공급한 후 양액의 pH가 5.5로 저하하면 다시 NH_4OH 를 공급하여 pH를 6.5로 높이면서 질소를 공급하여 재배하는 방법, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 를 질소원으로 이용하여 재배하는 방법, 0.5 me/l의 NH_4OH 와 3me/l의 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 를 혼합 공급하여 양액의 pH가 5.5로 저하하면 NH_4OH 를 첨가하여 6.5로 올려주는 방법과 표준액에서 재배한 상추와 미나리의 생육, NO_3^- 함량 및 NRA 및 GSA를 비교하였다.

2) 배양액의 $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$ 의 비율이 바실 생육 및 질산염(NO_3) 함량에 미치는 영향

본 실험은 양액재배시 배양액내 질소원의 비율이 바실 생육 및 근권환경변화에 미치는 영향을 구명하여 바실의 생산성과 품질을 향상시키고자 실시하였다. 바실의 질소 형태별 비율 실험은 sweet basil(*Ocimum basilicum* L.)을 공시재료로 하여 NFT로 재배하였다.

바실은 1997년 6월 3일에 폴리우레탄 스펀지에 파종하여 NFT시스템 하에서 육묘하였으며 1997년 7월 30일에 정식하였다. 배양액은 山崎(1982)의 n/w방법에 따라 계산된 양수분흡수율에 기초하여 개발한 시립대 배양액(SCU)을 기준양액으로 하여 $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ 의 비율을 100:0, 85:15, 70:30, 50:50 및 30:70으로 조성하였다. 기타 미량원소의 함량은 동일하게 처리하였다(Table 2-4).

생육기간중 pH와 EC의 일변화를 알아보기 위해 일정기간 배양액을 교체하지 않은 상태에서 pH와 EC는 조절하지 않았다. 매일 배양액내 pH와 EC의 변화를 조사하였으며 배양액은 주 1회 교환해 주었다.

Table 2-4. The composition of macronutrients in SCU developed in The University of Seoul for sweet basill.

Ratio ^z of NO ₃ ⁻ :NH ₄ ⁺	Nutrient concentration (me · L ⁻¹)					
	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg
100 : 0	12.8	-	3.6	5.8	5.8	3.0
85 : 15	10.9	1.9	3.6	5.8	5.8	3.0
70 : 30	9.0	3.8	3.6	5.8	5.8	3.0
50 : 50	6.4	6.4	3.6	5.8	5.8	3.0
30 : 70	3.8	9.0	3.6	5.8	5.8	3.0

^z Ratios of NO₃⁻ to NH₄⁺ in SCU.

배양액내 NO₃⁻와 NH₄⁺의 비율에 따른 식물체의 양분흡수상태를 조사하기 위해 배양액과 식물체의 지상부와 지하부의 무기성분을 분석하였다. 배양액 및 식물체 분석은 배양액 개발실험과 동일한 방법으로 실시하였다.

엽내 NO₃⁻ 함량을 측정하기 위해 생체중 5g을 유발에서 균일하게 마쇄하여 100 ml의 증류수를 가한 후 1000 rpm에서 원심 분리시켰다. 상정액 10 ml를 취하고 진한 염산(HCl)을 0.2 ml 가한 다음 켈달 분석법(Bremner, 1965)에 따라 질소자동증류기(Büchi 323)로 증류하여 NO₃⁻ 함량을 측정하였다. 수확후 생육과 수량을 조사하였으며 광합성 측정은 휴대용 광합성 측정기(LI-6200, Licor)를 사용하여 CO₂동화율과 기공저항을 측정하였다.

다. 식물공장에서 엽채류 품질(Tipburn) 제어

-공시시설

본 실험은 완전제어형(환경제어용 생육상) 식물공장과 인공광 병용형 벤로온실의 2가지 형태 식물공장에서 이루어졌다. 완전제어형 식물공장의 지상부 환경은 metal halide등과 고압나트륨등을 설치하여 200~300 μmol m⁻² s⁻¹ PPFD, 60±5% RH, 700~800ml L⁻¹ CO₂, 낮/밤의 길이를 16/8 시간으로 설정하였다. CO₂ 농도는 CO₂ 조절기(DGT volmatic, 3600)를 사용하여 공급하였으며, 근권의 pH는 5.5~6.0, EC는 1.3~1.5 dS m⁻¹로 자동 조절하였다(Fig. 2-5).

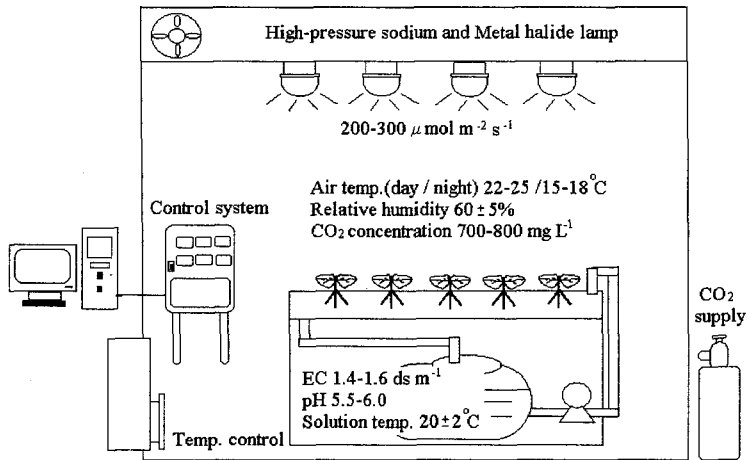


Fig. 2-5. Schematic diagram of nutrient film technique in the plant factory with a completely controlled environment.

인공광 병용형 베로온실은 매시간마다 내부습도, 외부 일사, 외부 강우 등을 관측한 자료가 복합환경 제어장치로 정보를 보내면 모든 환경제어장치를 조합시켜서 상추 재배를 위해 설정한 환경조건에 따라 각 제어부가 작동하는 실용적인 식물공장 형태로 인공광원은 고압나트륨등을 설치하였다(Fig. 2-6). 설정된 환경은 $1,500\sim 2,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD, $50\pm 10\%$ RH, $500\sim 600 \text{ml L}^{-1}$ CO₂ 주간/야간의 길이를 16시간/8시간으로 설정하여, 부족한 광은 인공광원으로 보광하였다.

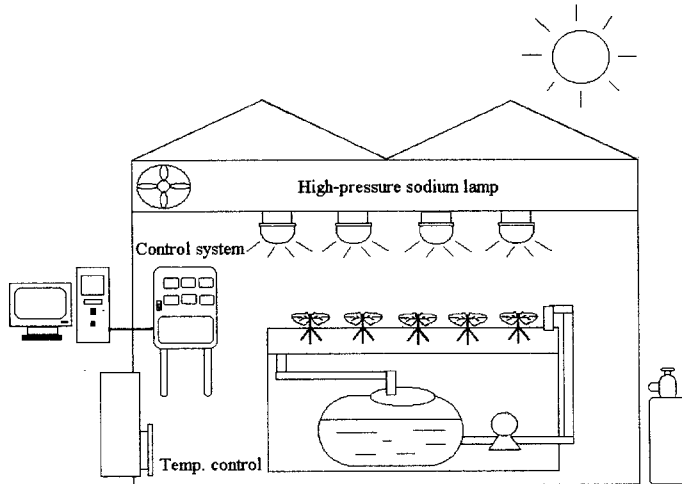


Fig. 2-6. Schematic diagram of nutrient film technique in the venlo greenhouse with an artificial light source.

-공시재료

상추(*Lactuca sativa* L.)중 잎이 유연하고 결구부가 열리는 반결구 형태인 'Omega'와 잎 형태인 'Grand Rapids'를 파종하여 서울시립대 인공광 병용형 벤로 온실에서 묘를 길렀다. 두 품종은 식물공장에 적합한 엽채류 품종으로 선발된 것으로 실험에 사용된 묘는 본엽이 6~7매 달린 균일한 묘를 사용하였다. 배양액은 서울시립대 상추 배양액으로 다량원소는 N: 10.8, P: 2.0, K: 6.0, Ca: 3.0, Mg: 2.0 me L^{-1} 이며, 미량원소는 Fe: 1.0, Mn: 0.5, B: 0.5, Zn: 0.2, Cu: 0.05, Mo: 0.05 mg L^{-1} 으로 동일하게 공급하였다. 배양액 관리는 pH는 5.5~6.0, EC를 1.3~1.5 dS m^{-1} 로 조절하여 양호한 생육을 유지시켰다.

1) 식물공장내 기온과 상대습도 조건이 상추의 광합성, 생육 및 잎끝마름 발생에 미치는 영향

가) 기온

반결구 상추와 잎상추를 1998년 7월 25일 파종, 정식한 후 8월 18일 조절된 환경제어용 생육상에서 주·야간 10/7℃, 20/15℃, 30/25℃의 3처리하여 15일, 25일, 35일 후 3회에 걸쳐 광합성과 증산률 및 생육조사를 실시하였다. 처리 3주 후에 기온의 영향이 세포막 변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 이온 유출을 측정하였다. 광합성은 완전전개잎(정단부로부터 12~16 엽위)을 오전 8시~10시 사이에 휴대용 광합성 측정기(Li-Cor, Li-6200)로, 증산률은 미전개잎(정단부로부터 2~3 엽위)과 완전전개잎으로 구분하여 porometer(Li-Cor, Li-1600)로 측정하였다. 광합성 측정장치에서 측정된 항목은 세포내 CO₂ 농도(intercellular CO₂ concentration; Ci), 대기중 CO₂ 농도(air CO₂ concentration; Ca), 광합성 (photosynthesis; Pn), 기공저항(stomatal resistance; SR)이었으며, 수분이용효율(water use efficiency; WUE)은 Malmstrom과 Field(1997)의 방법에 따라 $(Ca-Ci)/1.6\Delta w$, $\Delta w = 0.019 \text{ mol H}_2\text{O mol}^{-1}$ 의 식으로 계산하였다. 또한 생육조사시 잎끝마름 발생률과 상대생장률을 구하였다.

이온 유출은 전개잎 0.5g을 0.5cm로 잎 절편한 후 증류수 10mL를 넣어 2시간 진탕한 후 전기전도도계(TOA, CM-20E)로 EC를 측정하였다.

나) 상대습도

1998년 11월 12일 파종한 상추를 12월 24일 환경제어용 생육상에서 상대습도별로 주·야간 40/40%, 40/80%, 80/40%, 80/80%의 4처리하였다. 배양액 관리는 온도 처리와 동일하였으며, 처리 후 15일과 25일에 광합성, 증산률과 생육 조사 및 잎끝마름 발생률을 조사하였으며, 생육 조사 후 엽위에 따라 분리 채취하여 무기이온 함량을 분석하였다. 엽내 가리, 칼슘, 마그네슘 함량은 삼각 플라스크에 건물중 0.5g을 ternary solution(HNO₃:HClO₄:H₂SO₄=10:4:1) 10ml를 가해 분해한 후 원자흡광분광기(Perkin Elmer 3100)를 이용하여 각 파장별로 무기 양이온 함량을 측정하였다.

2) 식물공장내 근권 환경 조건이 상추의 광합성, 생육 및 잎끝마름 발생에 미치는 영향

가) pH

반결구 상추와 잎상추를 1998년 7월 25일 과중한 묘는 인공광 병용형 베로형 온실에서 NFT 베드에 8월 18일 정식하여 1주일간 순화시킨 후 pH 4.5, 6.0, 7.5의 3처리로 하였다. 처리 25일 후에 이온 유출과 엽록소 함량을 분석하였으며, 광합성과 증산률을 측정 후 생육 조사를 하였다.

엽록소 함량은 전개잎 0.1g을 햇빛이 들지않는 장소에서 80% 아세톤 10ml와 seasand를 넣고 즉시 유발에서 마쇄한 후 10,000g에서 원심 분리시킨 후 아세톤 10ml로 맞추어 흡광광도계(Shimadzu, UV-Vis 2100) 663nm와 645nm 파장에서 측정하였으며, 계산은 Mackney(1941)법으로 하였다.

나) 전기전도도(Electrical conductivity: EC)

-배양액의 총량으로 EC 조절

반결구 상추와 잎상추를 1998년 4월 16일 과중한 묘는 환경제어가 가능한 인공광 병용형 베로온실에서 NFT베드(60×120cm)에 5월 21일 정식하였다. 본 실험에 들어가기 앞서 생육 초기는 서울시립대 상추 배양액으로 순화시켜 양호한 생육을 유지시켰다. 6월 5일 EC별로 1.5 dS m⁻¹, 4.5 dS m⁻¹, 9.0 dS m⁻¹ 3처리한 후 2일 마다 pH와 EC를 조절하였다. 처리 1, 3, 5일, 7일, 14일, 21일에 GR 효소 활성과 근활력을 분석하여 시간 경과에 따른 변화량을 살펴보았다. 처리 전과 처리 3주 후의 상대수분함량을 측정 후 비교하였으며, 처리 25일째 광합성과 증산률 및 생육조사를 실시하여 잎끝마름 발생률을 조사하였다.

상대수분함량(RWC)은 정단부로부터 13~15번째의 전개된 잎을 다음 식으로 계산하였다.

$$RWC(\%) = (\text{채취잎 무게} - \text{건조잎무게}) / (\text{포화잎 무게} - \text{건조잎 무게}) \times 100$$

GR 활성 분석은 0.2g을 정량한 후 추출용액 (50mM K-P buffer, 5% PVP, 5mM AsA, 5mM DTT, 5mM EDTA, 0.1M NaCl 함유)을 2ml 가하여 균질화하였다. 15,000g에서 5분간 원심분리한 후 상정액 150 μ l를 취하여 반응액(H₂O 2.43 ml, 1M K-P buffer(pH 7.8) 300 μ l, 10mM GSSG 60 μ l, 10mM NADPH)과 혼합하

였으며 이때 산화, 환원 반응을 340nm에서 90초간의 흡광도 변화로 측정하였다. 단백질 정량은 Bradford(1976)의 방법에 의하여 Bio-rad protein assay (Bio-Rad Laboratories, USA) 5배 희석액에 원심분리한 상정액을 100:1로 가하여 반응시킨 후 595nm에서의 흡광도를 측정하여 단백질 1mg당 효소활성을 산정하였다.

근활력 측정은 뿌리시료를 1cm로 균일하게 절단한 후 0.5g을 시험관에 넣고 1% TTC용액:0.1M NaH_2PO_4 buffer:증류수=1:4:5의 비율로 혼합한 용액 10ml를 가했다. 뿌리가 혼합 용액에 침지되도록 하여 용액중에 기포발생이 없을 때까지 충분히 탈기시킨 후 30°C의 암상태에서 2시간 반응시킨 후 2N H_2SO_4 2ml를 가하여 반응을 정지시켰다. 뿌리를 꺼내 증류수로 잘 씻은 후 ethyl acetate 3~5ml와 seasand를 소량넣어 유봉으로 마쇄하여 formazan를 추출하여 470nm에서 흡광도를 측정하였다.

-NaCl로 EC 조절

환경제어가 가능한 인공광 병용형 벤로 온실에서 반결구 상추를 어느 정도 일정한 생육이 유지되도록 관리하여 1999년 1월 12일에 플라스틱 포트에 옮겨심었다. 이 때 각 처리별 생육이 일정하도록 상위엽으로부터 15~16매의 엽을 가지도록 하위엽은 제거한 후 3일동안 순화시킨 후 EC별 1.5 dS m^{-1} , 4.5 dS m^{-1} , 9.0 dS m^{-1} 3처리, 4반복 하였다. 배양액의 EC 처리는 NaCl 량으로 조절하여 배양액 내 무기양이온의 함량은 동일하였으며, Na 함량만 EC 증가에 따라 높아졌다.

엽 처리 20일 후 식물체가 흡수한 총 수분량을 측정하였으며, 생육 조사 후 엽 위별로 분리 채취하여 엽내 무기양이온 함량을 분석하였다. 엽내 무기양이온 함량은 2.2의 항목과 같은 방법으로 실시하였다.

다) 용존산소 농도

환경제어가 가능한 인공광 병용형 벤로온실에서 1998년 10월 16일부터 11월 4일까지 저농도(2~3ppm), 중간 농도(5~6 ppm), 고농도(7~8 ppm)의 3처리로 스티로폼 상자에서 담액방식으로 수행하였다. 근활력과 증산률 및 생육 조사는 용존산소 처리 15일 후에 분석, 측정하였다.

마. 철함량이 높은 기능성 엔디브 생산기술개발

채소의 원예 치유적 효과가 있는 특수성분에 대한 것은 Schuphan (1976)이 무기염류에서는 Fe의 함량이 높은 채소로는 시금치, 케일, 리크, 엔디브, 오이 등이 있다고 발표하였다. 그 중 엔디브는 상추와 매우 유사한데 내한성이 강하며 독특한 쓴맛이 우리의 기호에 맞고 재배가 용이하여 농가에서 쉽게 가꿀 수 있는 이 점이 있어서 엔디브 (*Chichorium endivia* L.)를 택하였다.

엔디브의 엽내 Fe함량을 증가시키기 위하여 1997년 8월 11일부터 1997년 10월 2일까지 실험을 수행하였다.

엔디브는 내한성 작물 이어서 고온 (25 ℃이상)에서는 발아가 안 되므로 8월 11일에 실내에서 페트리디쉬에 발아를 시킨 후 8월 14일에 폴리우레탄 스폰지에 옮겨 심고 떡잎이 나올 때까지 물을 공급하여 재배하였다. 정식은 8월 24일에 NFT 방식의 베드 (400 × 140 × 70 cm)에 하였고 배양액은 서울 시립 대학교 엔디브 배양액 (NO₃-N 15.0, NH₄-N 1.0, PO₄-P 3.0, K 10.0, Ca 5.0, Mg 3.5 me·L⁻¹)을 1/2S의 농도로 공급하였다. 배양액의 pH는 3일에 한 번씩 5.5~6.2로 보정하여 주었다. 근권내의 고농도 Fe처리방법은 수확직전에 단기간 공급하여 엽내 Fe함량을 높이고자 실시하였다. Fe의 공급원으로는 일반적으로 수경재배에서 많이 사용하는 Fe-EDTA와 물에 잘 녹는 ammonium ferric citrate (AFC)를 사용하여 예비실험을 하였다. 작물에 50 me·L⁻¹과 100 me·L⁻¹을 처리하여 2일간 재배한 후 Fe-EDTA는 50 me·L⁻¹과 100 me·L⁻¹에서 Fe과잉증상인 엽의 테두리에서부터 검은반점이 생기고 시간이 지날수록 엽전체로 퍼져 잎이 고사하였지만 ammonium ferric citrate (AFC)를 같은 농도로 처리한 잎에서는 이러한 증상이 나타나지 않았다. Fe-EDTA에서 생긴 증상이 실험시 pH 5.0으로 하여서 낮은 pH의 피해의 원인인가 싶어서 pH를 6.0으로 하여 같은 처리를 하였지만 똑같은 현상이 나타났다. 따라서 이 증상이 Fe가 원인이라는 것을 알았다.

따라서 본 실험에서는 Fe의 공급원으로 ammonium ferric citrate (AFC)를 택하였고 AFC는 낮은 pH에서 흡수가 잘 되므로 처리구의 pH는 각각 pH 3.0과 pH 4.0로 하였고 Fe의 처리농도는 50 me·L⁻¹, 100 me·L⁻¹으로 하였다. 이끼발생등을

막기위해 흑색비닐로 멀칭한 베드 (41 × 57 × 16 cm)에 양액 10 l를 넣었고 베드의 크기와 비슷하게 자른 스티로폼에 8개의 구멍을 뚫어 그 위에 놓았다. 산소 공급은 time clock를 이용하여 15분당 5분씩 작동하도록 하였다. 스티로폼의 구멍 한 개에 한 주씩 심고 처리기간은 12시간 단위 (12, 24, 36, 48 hr)로 실시하여 한 베드에 6 주씩 심고 2 주는 여분으로 심었다. 처리기간 동안 pH는 보정하지 않았다. 각 처리시간마다 배양액과 식물체를 채취하여 지상부와 지하부의 무게를 측정하였다. 채취한 식물체는 지상부와 지하부로 나누어서 증류수로 4차례 세척한 후 물기를 제거하여 풍건 건조기에 넣어 70 °C에서 완전히 건조시켜 분쇄하여 분석 시료로 준비하였다. 분석한 무기성분의 종류는 철, 망간, 구리, 칼슘, 마그네슘, 인산 함량을 측정하였다. 분석방법은 앞서 실험한 배양액 개발 · 적합성 검정에서 사용한 방법과 같다. 식물체의 무기성분을 정량한 후 건물중 100g에 대한 g으로 환산하였다.

바. 식물공장 유형별 상추 생육 및 품질

98년 6월 2일 3종류의 상추를 파종하여 3종류 식물공장(완전제어형, 태양광 이용형, 인공광 이용형 식물공장)에 6월 20일에 정식하였다. 재배환경은 완전제어형에서 광도 $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 일장 16시간, 주간기온/야간기온 24/20°C, 액온 20~24°C, CO₂농도 1500ppm, 기공속도 0.5~0.8m/s, 배양액 농도 1.6~1.8mS/cm, 배양액 pH5.5~6.2, 용존산소 7.0mg · L⁻¹이상으로 관리하였으며, 태양광 이용형과 인공과 병용형 식물공장에서는 주야간 기온을 20~28/18~22°C(여름)으로 베히온실을 관리하고 다른 요인은 완전제어형 식물공장과 동일하게 조절하여 수행하였다.

또한 완전제어형 식물공장, 인공광 병용형 식물공장(plant factory), 관행구인 양지붕형 온실내에 따른 상추의 생육을 살펴보기 위해 실험을 수행하였다. 완전제어형 식물공장의 지상부 환경은 metal halide등과 고압나트륨등을 혼합하여 250~300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PPFD, 50~70% RH, 500~600ml L⁻¹ CO₂, 온도는 주/야 20~

22/16~18℃로 하였으며 주/야의 길이를 16/8 시간으로 설정하였다. 근권의 pH는 5.5~6.2, EC는 1.5dS m⁻¹로 자동조절 하였다. 수온은 20±2℃로 조절하였다. 인공 광 병용형 식물공장은 매시간 내부습도, 외부 일사, 외부 강우 등을 관측한 자료가 복합환경 제어장치로 정보를 보내면 모든 환경제어장치를 조합시켜서 상추 재배를 위해 설정한 환경조건에 따라 각 제어부가 작동하는 실용적인 식물공장 형태로 인공광원은 고압나트륨등을 설치하였다.

설정된 환경은 1500~2000 μmol m⁻²s⁻¹ PPFD, 50~60% RH, 500~600ml L⁻¹ CO₂, 온도는 주/야 24~26/18~20℃, 주/야의 길이를 16/8시간으로 설정하여, 부족한 광은 인공광원으로 보광하였다. 근권의 pH는 5.5~6.2, EC는 생육단계별로 초기 1.4dS m⁻¹, 중기 1.6dS m⁻¹, 후기 1.8dS m⁻¹로 하였으며, 수온은 20±2로 조절하였다.

양지봉형 온실은 인공광의 병용이나 보충 없이 자연광으로만 작물을 재배하였다. 설정된 환경은 1500~2000 μmol m⁻²s⁻¹ PPFD, 40~80% RH, 500~600ml L⁻¹ CO₂, 온도는 주/야 25~32/18~20℃, 주/야의 길이는 12/12 시간이었다. 근권의 pH는 5.5~6.2, EC는 1.5dS m⁻¹로 하였으며, 수온은 20±3℃으로 조절하였다.

공식식물로 상추(*Lactuca sativa* L.)중 잎이 유연하고 결구부가 열리는 반결구 형태인 'Omega'와 청측면계 상추인 'Grand Rapids'를 페트리디쉬에 파종해서 발아 시킨후 폴리우레탄 스폰지에 옮겨서 스티로폼 성형제품 [40(W)×55(L)×12(H)cm]에 서울시립대학교 잎상추 배양액(다량원소 N 10.8, P 2.0, K 6.0, Ca 3.0, Mg 2.0이며, 미량원소 Fe 1.0, Mn 0.5, B 0.5, Zn 0.2, Cu 0.05, Mo 0.05 me L⁻¹)을 사용해 EC는 0.8dS m⁻¹로 해 주었으며, 용존산소를 7.0 ppm 이상으로 관리하였다. 그후 육묘 후기에는 배양액 EC를 1.5dS m⁻¹로 높여 주었다.

실험은 반결구 상추와 청측면계 상추를 2000년 9월 20일에 파종하고, 10월 13일에 조절된 세가지 환경상의 온실에 각각 옮겨졌다. 실험에 사용된 묘는 본엽이 4~5매인 균일한 묘를 사용하였다. 여기서 식물공장은 생육단계별로 배양액 조성을 다르게 해주었는데, 정식 후 1주 동안은 EC 1.4dS m⁻¹, 2주째에는 1.6dS m⁻¹, 3주째에는 1.8dS m⁻¹로 해주었다.

생육조사는 정식 후, 1주, 2주, 3주에 각 단계별로 하였다. 식물체는 생육조사 후

지상부와 지하부를 각각 건조기에 넣어 65℃에서 완전히 건조시킨 후건물중을 측정하였다.

사. 완전제어형 식물공장 인공광원에 따른 상추의 생육 및 품질

서울시립대학교 대형 컨테이너{12(L)×2(W)×3m(H)}에 완전제어형 식물공장 시스템을 설치하여 실험하였다. 공시작물은 결구상추(*Lactuca sativa* L) 'L-6' 품종을 1996년 2월 27일에 파종하여 3월 20일 베드에 정식하였다. 인공광원으로는 고압나트륨등(430W), 메탈할라이드등(250W)과 형광등(40W)를 사용하였다. 광원수는 고압나트륨등 3개, 메탈할라이드등 3개와 형광등 14개를 사용하여 광합성 유효광양자속 밀도(Photosynthetic photon flux density, PPFDF) $200 \pm \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 으로 조절하였다. 광원과 베드 표면간의 거리는 고압나트륨과 메탈할라이드등이 75~80cm, 형광등이 30~35cm였다. 조명시간은 아침 6시부터 저녁 8시까지 14시간 조명하였다. 온도조절은 주간 20~25℃, 야간 20℃로 관리하였으며, 상대습도는 $70 \pm 5\%$ 로 관리하였다. 배양액은 지바대액을 기준으로 하여 조성하였으며, 재배방식은 박막수경(NFT)방식으로 하였다. 배양액의 pH는 5.5~6.0으로 배양액 농도는 $1.5 \pm 0.2 \text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 로 자동 조절하였다. 1,000~1,200 $\mu \text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 로 공급해 주었으며, 정식 33일 후부터 5일 간격으로 배양액을 분석하였다. 그리고 정식 6일 후부터 5일 간격으로 생육을 조사하였다.

아. 공장적 대량생산 시스템 개발

태양광 병용형 식물공장에서 공장생산 시스템의 핵심이라고 할 수 있는 재배장치를 평면 이동 방식으로 한 주간 조절장치와 이송시스템으로 벨트를 이용한 컨베이어 시스템을 활용한 재배식물의 적응성 검정과 효율을 검토하기 위해서 업체류를 재배하였다.

벤노 온실에서 규모가 $(2 \times 7\text{m}) + (2 \times 6\text{m}) = 26\text{m}^2$ 인 식물공장을 만들었으며, 재배장치로는 PLC 및 PC제어, 평면이동, 자동 spacing, 자동이송장치를 광원으로는 고효압나트륨램프(Philips, Son-t 400W)를 2×2 간격으로 설치하였다. 양액재배 시스템으로는 NFT를 이용하였다. 재배환경조절은 PC를 이용해 실내온도는 $20\text{-}24^\circ\text{C}$ 로, 일장은 16시간, CO_2 는 $1200\text{-}1500\text{ppm}$ 으로, 상대습도는 $50\text{-}80\%$ 로 제어했다. 배양액 조절은 서울시립대학교 엽채류 배양액을 기준으로 생육단계에 따라 EC는 $1.2 \rightarrow 1.5 \rightarrow 1.8\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 로 pH는 $5.5\text{-}6.2$ 로 다량원소인 N, P, K, Ca, Mg를 중심으로 PC를 이용해 이온을 제어해 주었다.

정식은 $3\text{-}5\text{g}$ 인 묘를 이용하였으며, 베드간격은 1stage: $20 \times 10\text{-}12\text{cm}$, 2stage: $20 \times 15\text{-}18\text{cm}$, 3stage: $20 \times 20\text{-}24\text{cm}$ 으로 제어해 주었다.

2. 결과 및 고찰

가. 미나리 주년 생산을 위한 적정 수경재배 시스템 개발

Fig. 1은 각 양액재배 방식에 따른 미나리 생육기간 동안 양액내 EC와 pH를 나타낸 것이다. 대체적으로 80cm mist-spray 처리구를 제외한 나머지 처리구에서의 EC는 생육 후반기까지 $1.60\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 로 유의적인 변화가 나타나지 않았으며, 수확기에 양액의 농도가 약간 증가하는 경향을 보였다. 그리고 80cm mist-spray 처리구에서는 생육초기부터 다른 처리구와 비교해 약간 높은 EC를 보이다가 생육이 진전될수록 그 차이가 뚜렷하게 나타났다.

이러한 경향은 40cm mist-spray 처리구의 근권부 온도가 다른 처리구보다 약간 높은 경향을 보여서 식물체에 의한 양수분 흡수 차이에 기인한 것으로 생각된다(Fig. 2-7).

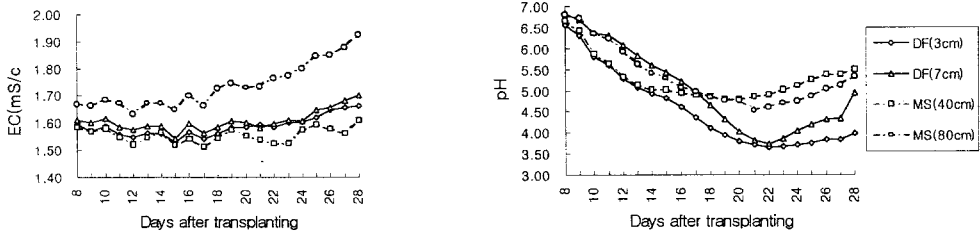


Fig. 2-7. The changes of EC and pH of nutrient solution during culture period of *Oenanthe stolonifera* DC. among different hydroponic systems. In legend, DF(3cm), DF(7cm), MS(40cm) and MS(80cm) indicate deep-flow with 3cm, 7cm nutrient solution level and MS with 40 and 80cm depth of bed, respectively.

pH에 있어서는 모든 처리구 공히 생육초기에 감소하다 생육후반기에 다시 증가하는 경향을 보여 암모니아태질소를 우선적으로 흡수하는 미나리의 양분흡수특성 때문인 것으로 생각된다(Maynard 등, 1976; Ikeda와 Osawa, 1980; Ikeda와 Osawa, 1981; 이와 이, 1991).

특히 deep-flow 방식에 있어서 그 변화의 폭이 크게 나타났는데 mist-spray 방식에서는 뿌리에서 양액을 흡수할 수 있는 시간이 deep-flow 방식보다 상대적으로 짧기 때문에 양액내의 암모니아태질소의 흡수가 더디게 일어나 pH의 변화가 적었던 것으로 생각된다.

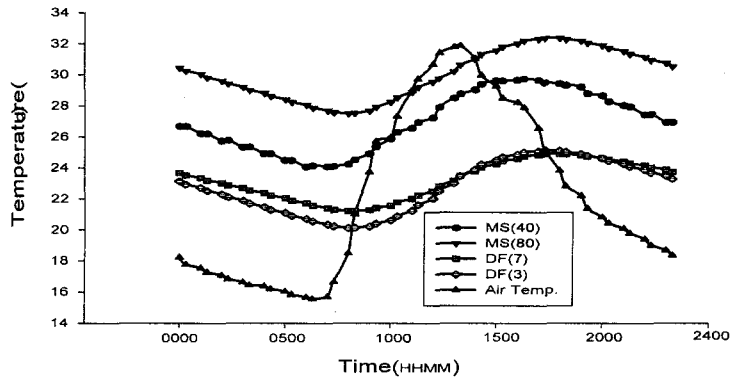


Fig. 2-8. The changes of temperature inside the bed, air and relative humidity of air. Legends see Fig. 2-7.

각 처리구에서 재배기간 동안의 미나리 생육은 Fig. 2-8에 나타난 바와 같다. 전반적으로 7cm deep-flow 방식과 40cm mist-spray 처리구에서 생육 후기에 왕성한 생육을 보였다. 반면에 3cm deep-flow 및 80cm mist-spray 방식에서는 초장의 완만한 증가세를 보였다. 미나리는 각 3단계의 생육 양상을 보이는 것으로 생각되는데, 종자 파종기에서 정식기까지의 육묘기와 정식기부터 생육 중반기까지의 생육이 더딘 반면 일정한 시기에 이르면 일장의 영향으로 절간이 급격히 신장하여 초장이 급격히 증가하는 경향을 보이며, 이는 미나리의 외적인 품질로서도 긍정적인 특성 중 하나이다. 본 시험에서는 대체적으로 7cm deep-flow 방식과 40cm mist-spray 방식에서 유사한 생장을 보여 미나리의 품질이 양호한 것으로 나타났다.

따라서 주 절간장은 모든 재배 방식에서 생육 후반기에 급격히 증가하는 경향을 보였으며 특히 80cm mist-spray 처리구에서는 Fig. 2-8에서처럼 근권부 온도 상승에 따른 생육 저하로 다른 처리구에 비해 낮은 절간 신장을 보였다.

발육의 지표인 엽의 발생수에 있어서는 처리간 유의적인 차이가 나타나지 않았으나 생육초반기에 7cm deep-flow 방식에서만 약간 높은 결과를 보였으며 이는

다른 처리구에서 미나리의 하엽이 1~2개 고사한 반면 7cm deep-flow에서는 상위엽과 비슷한 생장을 보였기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 생육이 진전될수록 그 차이는 유의적으로 나타나지 않았다. 절간수에 있어서 생육초기부터 3cm deep-flow 처리구에서 낮은 수치를 보여 다른 처리구간에 유의적인 차이를 나타냈는데 생육 후반기까지 그 양상이 계속되는 결과를 보였다. 이는 3cm deep-flow 재배방식에서는 급격한 온도변화에 따라 근권부 양수분 흡수가 원활하지 못하여 결과적으로 저조한 절간 발생을 일으켰던 것으로 생각된다.

근권부 일중 온도 변화(Fig. 2-8)는 대체로 분무수경에서 상당한 수준까지 올라갔으며 대체로 대기 온도가 정점에 달하는 14:00경보다 4시간 뒤에 80cm mist-spray에서는 32℃까지 증가하여 대기온도보다 더 높아졌다. 이는 결국 뿌리의 호흡을 증가시키고 이로 인한 지상부 대사변화를 초래하여 80cm mist-spray 처리구에서 지상부의 생육이 가장 열악한 결과를 보였다. 또한 생육 후반부에는 고온 스트레스에 의해 뿌리가 갈변하는 결과를 보였다. 그러나 40cm mist-spray 처리구에서도 80cm mist-spray 처리구에 비해 약 4℃ 가량 낮아 근권부 및 지상부 생육이 양호하였다. 그리고 담액재배조에서는 온도의 변화가 크지 않아 7cm deep-flow 처리구에서 양호한 근권부 생육 양상을 보였다.

수확시의 미나리 생육양상을 Fig. 2-9와 Table 2-5에 나타내었는데, 초장에서 가장 양호한 생육을 보인 것은 40cm mist-spray 처리구였으며 3cm deep-flow 처리구에서 생육이 현저하게 저조하였다. 엽수와 주 절간장은 처리간 유의적인 차이는 나타나지 않았으나 40cm mist-spray 처리구에서 양호한 생육 결과를 보였다. 영양생식기관인 포복경의 발생수는 각 처리간에 유의적인 차이를 보였는데, 7cm deep-flow 방식에서 발생이 가장 많았고 80cm deep-flow 처리구에서 가장 낮은 발생수를 보였다. 그러나 주 포복경장은 7cm deep-flow 방식과 80cm mist-spray 방식에서 가장 긴 경향을 나타내 포복경의 발생과 그 생장에는 유의적인 상관관계가 나타나지 않았다.

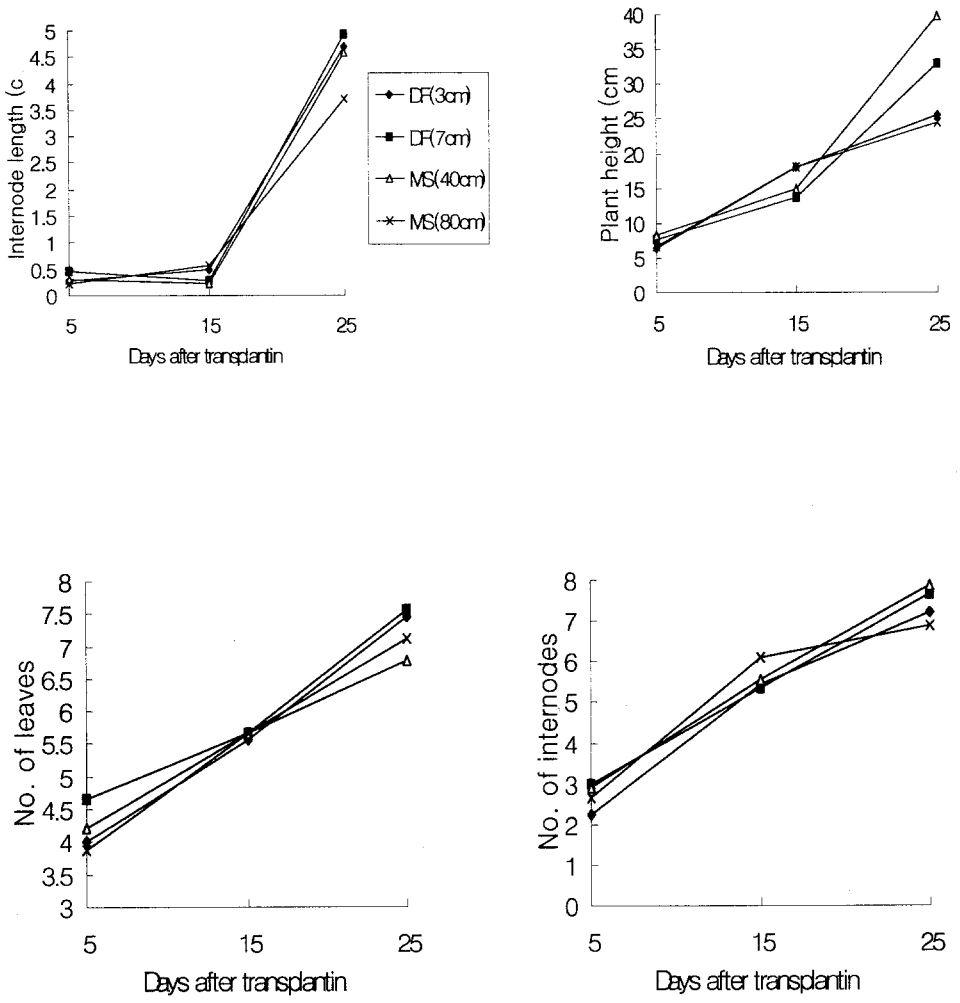


Fig. 2-9. The growth fluctuations of *Oenanthe stolonifera* DC. among different hydroponic systems. In legend, DF(3cm), DF(7cm), MS(40cm) and MS(80cm) see Fig. 2-7.

Table 2-5. The effects of different hydroponic systems on the growth of water dropwort at harvest.

Culture system	Plant height (cm)	No. of leaves	No. of internodes	Length of main internode	No. of stolons	Length of main stolon	
Deep flow	Low(3)	25.40 c ^z	7.44 a	7.22 ab	4.08 a	4.78 bc	24.84 b
	Deep(7)	33.02 b	7.56 a	7.67 ab	4.92 a	5.67 a	32.51 a
Mist spray	Low(40)	39.84 a	6.78 a	7.89 a	4.58 a	5.56 ab	25.40 b
	Deep(80)	24.40 c	7.11 a	6.89 b	3.71 a	4.67 c	33.02 a

^z Duncan's multiple range test, p=0.05

Table 2-6은 각 재배 방식에 따른 미나리의 생체중, 건물중, 엽록소 함량 및 근권부 생육을 살펴 본 것이다. 지상부 생체중은 40cm mist-spray 처리구에서 가장 무거웠으며 7cm deep-flow, 3cm deep-flow 및 80cm mist-spray 순으로 나타났다. 지하부의 생체중도 지상부의 생체중과 비슷한 양상을 보였으며 결과적으로 지상부 및 지하부 건물중도 유사한 결과를 나타냈다. 주 근장의 길이에 있어서는 7cm deep-flow 방식과 40cm mist-spray 방식에서 유사한 길이를 보였으며 나머지 재배방식에서는 생육이 양호하지 못했다. 이러한 생육 차이는 뿌리의 부피에서 극명하게 나타나는데 40cm mist-spray 처리구에서 가장 높게 나타났고 3cm deep-flow 처리구에서 가장 낮게 나타났다. 따라서 지상부의 생육은 근권부의 생육에 따라 전적으로 영향을 받을 수 있다. 그러나 각 처리간 생육의 차이에도 불구하고 엽록소 함량에 있어서는 유의적인 차이가 나타나지 않았다.

Table 2-6. The effects of different hydroponic systems on the fresh weight, dry weight, chlorophyll contents and root growth, respectively, in water dropwort.

Culture system	Fresh weight(g)	Dry weight(g)		Chlorophyll content(mg · g ⁻¹ FW)			Root length (cm)	Volume of root (ml)		
		Leaf	Root	a	b	Total				
Deep flow	Low(3)	19.50 c ^z	2.02 c	3.55 b	0.29 c	1.38 a	0.54 a	1.92 a	20.78 b	5.22 c
	Deep(7)	27.93 b	3.33 b	4.21 b	0.41 bc	1.48 a	0.59 a	2.07 a	26.09 a	8.44 b
Mist spray	Low(40)	36.02 a	6.70 a	5.07 a	0.64 a	1.52 a	0.62 a	2.14 a	30.11 a	14.22 a
	Deep(80)	18.65 c	3.32 b	3.83 b	0.46 b	1.48 a	0.61 a	2.09 a	18.08 b	7.78 b

^z Duncan's multiple range test, p=0.05

Table 2-7는 생육초반부와 후반부의 광합성 효율과 기공 전도도를 나타낸 것이다.

생육 초기에 전체적으로 낮은 생육을 보였던 80cm mist-spray에서 광합성 효율이 가장 높았으나 대체적으로 생육이 양호하였던 40cm mist-spray와 7cm deep-flow 처리구에서는 상대적으로 낮은 광합성 효율을 나타냈다. 이러한 결과는 본 시험에서 시간에 따른 조도의 변화를 고려하지 않았기 때문에 가시적인 생육과 반대되는 경향으로 나타난 것이라 생각되며, 일정 기간 동안의 광합성 효율을 계속적으로 조사한다면 광합성과 생육과의 상관관계가 극명하게 나타날 수 있으리라 기대된다. 그리고 생육 후반부에는 생육전반부에 나타났던 유의적인 차이가 거의 나타나지 않았으며, 다만 7cm deep-flow 처리구와 80cm mist-spray 처리구에서 약간 낮은 광합성 효율을 보였다.

기공 전도도에 있어서도 광합성 효율과 비슷한 경향을 보였는데, 이는 앞에서 산소와 이산화탄소의 교환이 왕성해져 광합성 효율이 증가하게 되면 기공이 많이 열리게 되고 결과적으로 기공 전도도도 증가하게 되는 것으로 생각된다.

Table 2-7. The influence of different hydroponic systems on photosynthesis rate and stomatal conductivity of water dropwort at 10 and 25 days after transplanting.

Culture system depth(cm)	Photosynthesis rate ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		Stomatal conductivity ($\text{molH}_2\text{Om}^{-2}\text{s}^{-1}$)		
	Days after		transplanting		
	10	25	10	25	
Deep flow	Low(3)	19.63 b ^z	7.42 a	0.223 ab	0.077 a
	Deep(7)	16.28 c	6.32 a	0.766 bc	0.092 a
Mist spray	Low(40)	16.63 c	8.31 a	0.136 c	0.135 a
	Deep(80)	22.18 a	6.81 a	0.243 a	0.092 a

^z Duncan's multiple range test, p=0.05

각 처리구 간에 재배하는 동안 양액 내의 K^+ , $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 $\text{PO}_4\text{-P}$ 의 함량 변화를 경시적으로 살펴 본 결과는 Fig. 2-10과 같다.

각 처리구에서 질산태질소와 인산 함량은 생육이 진전될수록 약간 증가하는 경향을 보였으며, 질산태질소 함량에 있어서는 80cm mist-spray 처리구에서 생육 중반부까지 급격히 증가하다 후반부에서는 다른 처리구와 같아지는 경향을 보였다. 인산 함량은 생육 초반에 deep-flow 재배방식에서 mist-spray 방식보다 유의적으로 낮은 함량을 보이면서 생육 후반기까지 식물체의 높은 흡수율을 보였다. 대체로 인산과 칼슘 등은 근권부 온도가 높을수록 생체로의 이동이 낮다고 알려져 있다. K^+ 함량은 3cm deep-flow에서만 식물체의 흡수가 많아지다 생육 후반에는 그 흡수 수준이 거의 비슷해지는 경향을 보였다.

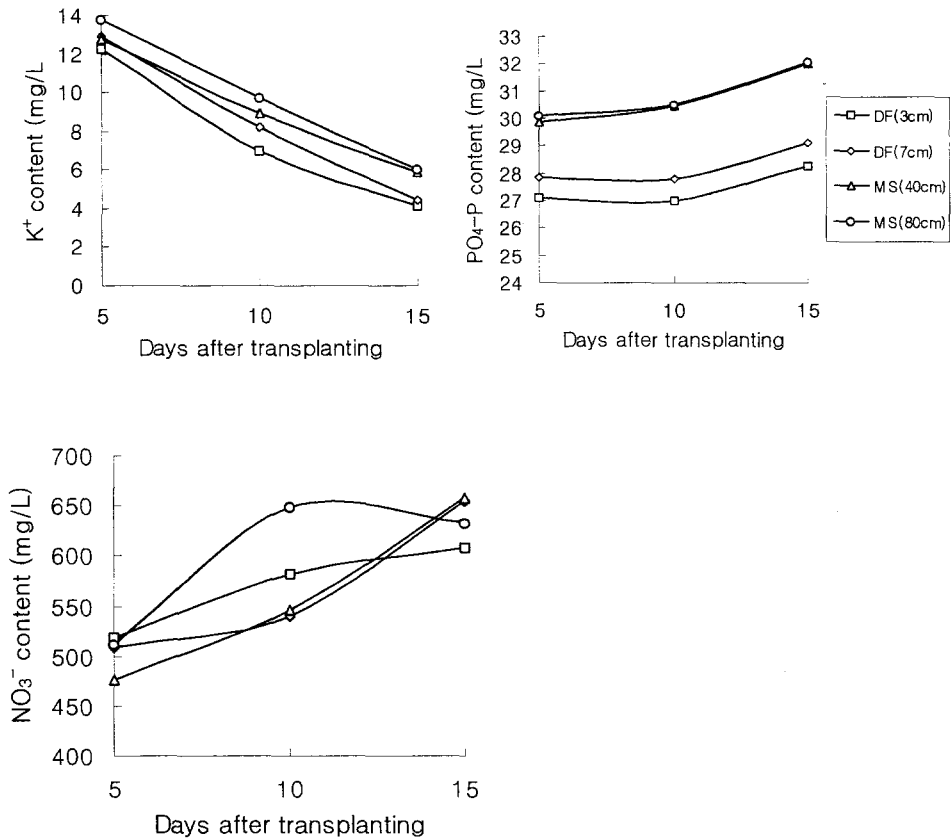


Fig. 2-10. The ion compositions in nutrient solution among different hydroponic systems at 5, 10 and 15 days after transplanting. In legend, DF(3cm), DF(7cm), MS(40cm) and MS(80cm) see Fig. 2-7.

결과적으로 담액수경방식에서는 양액과 뿌리간의 직접적인 양수분 흡수와 이온 상호작용에 의하여 pH의 변화 폭을 줄이고 어느 정도의 완충능력을 줄 수 있는 7cm 담액수경에서 근권부의 생육이 양호하였으며, 3cm 담액 처리구에서는 여름철 용존 산소의 부족과 액온의 변화를 크게 초래할 수 있어 전반적인 생육은 불량하였다.

반면에 이를 어느 정도 해소할 수 있는 분무수경에서는 양액과 뿌리의 직접적인 상호관계보다는 대기의 온도와 습도에 영향을 많이 받기 때문에 pH와 EC의

영향을 덜 받아 미나리의 생육이 양호하였던 것으로 생각된다. 그러나 뿌리가 위치한 베드의 깊이가 깊을수록 오히려 생육저하를 가져왔으며 이의 주된 원인이 근권부의 과도한 온도 상승에 기인한 것으로 생각된다.

앞으로 근권부 환경을 생육에 적합하도록 하기 위해서는 pH나 EC의 변화가 적은 분무수경에서 적정 온도를 유지시킬 수 있는 저렴하고 경제적인 기술 개발이 필수적으로 따라 주어야 할 것으로 생각된다.

나. 공장생산을 통한 품질향상 체계 연구

1) 생육단계별 양액 농도구명

Fig. 2-11과 2-12은 생육기간동안의 pH와 EC를 각각 나타낸 것으로 pH는 농도가 높을수록 변화폭이 크게 나타나 특히 1.5배 농도에서 pH가 저하하였다. 정식 후 12일째까지 Yamazaki 처방액으로 재배하다 생육후기 구멍된 조성으로 농도를 달리한 결과에서도 1.5배액에서 변동이 심하였고, 모두 0.5배액에서 변동폭이 좁게 나타났다. EC의 변화도 pH와 유사한 결과를 보였으나 0.5배액으로 연속 재배하였을 경우 생육후기에 EC가 $0.34\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 낮아져 생육에 좋지 않은 영향을 미친 것으로 생각된다.

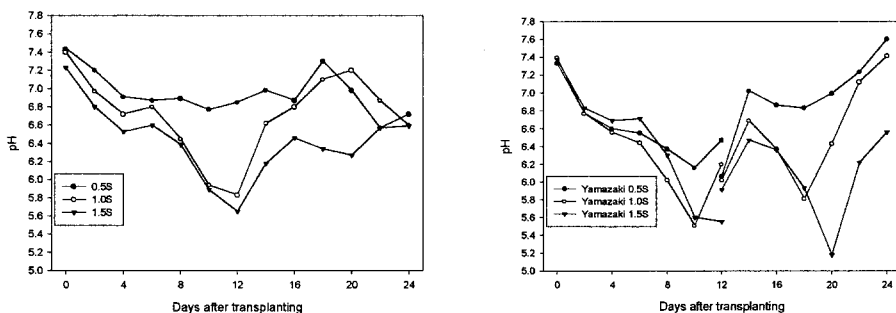


Fig. 2-11. The pH of nutrient solution developed previous experiment

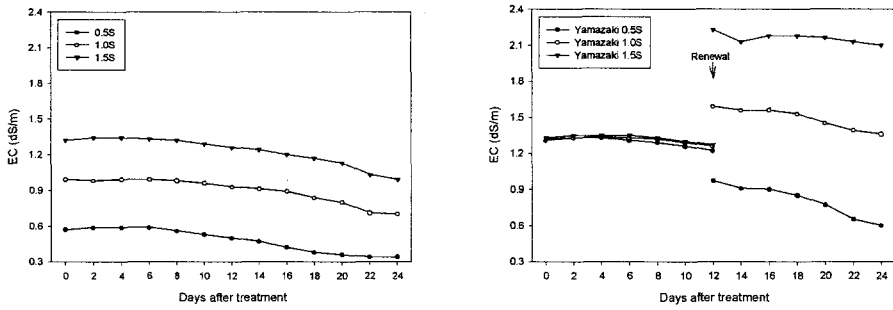


Fig. 2-12. The EC of nutrient solution developed previous experiment.

재배기간 동안의 기온은 15~30°C 사이였으며, 양액의 최대, 최소 온도는 그 범위 내로 변화폭이 유사하게 나타났다(Fig. 2-13). 양액의 온도변화는 일사량과도 깊은 관계가 있어 일사가 높을 때 기온과 액온도 높아졌으나 상대습도는 일사량과 반대 경향을 나타냈다(Fig. 2-14).

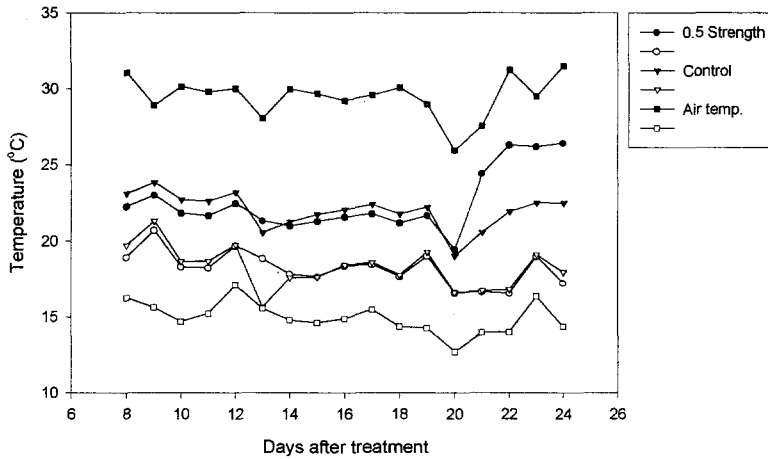


Fig. 2-13. The maximum(black) and minimum(open) temperature of nutrient solution and air during treatment period.

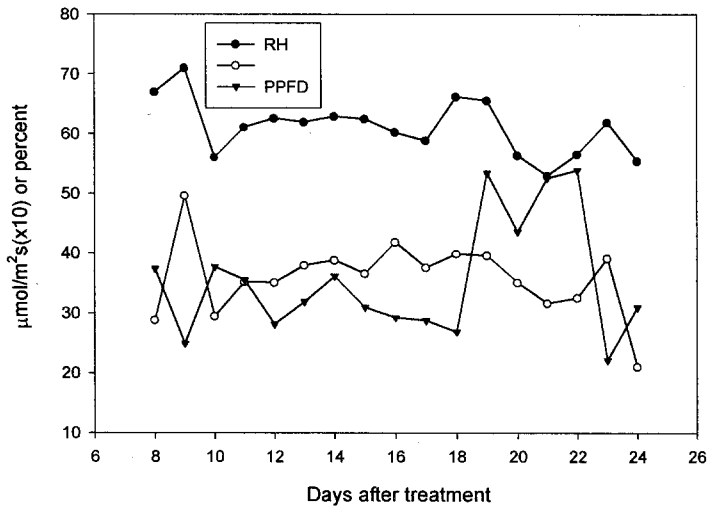


Fig. 2-14. The photosynthetic photon flux density and relative humidity.

Table 2-8은 처리간 상추 생육을 나타낸 것으로 생육전기의 엽장, 엽폭, 엽수 및 근장은 농도가 높을수록 높게 나타났으며 지상부 생체중은 1배액에서 낮고 함수량도 가장 낮게 나타났다.

반면 생육후기에 각 농도에서 연속 재배한 것과 전기까지 Yamazaki 처방액으로 재배한 후 구멍된 조성으로 농도를 달리하여 생육을 비교해보면 일반적으로 생육전기부터 1~1.5배액으로 연속 재배한 것에서 생체중과 건물중이 높게 나타났다. 생육후기의 처리구만을 비교해보면 1배액에서 양호한 결과를 보였다. 이러한 결과는 Table 2-9에서와 같이 각 단계별 상대생장률에서도 유사하게 나타났는데, 12DAT에 0.5배 농도에서 상대생장률이 가장 높았고 1.5배 및 1.0배 순이었다. 생육중기에는 무교체 연속 재배구에서도 역시 0.5배액, 생육중기 농도별 처리에서는 1.0배액에서 상대생장률이 높게 나타나 수분함량이 적고 건물생산량이 많으면 상대생장률이 높은 것을 알 수 있다.

Table 2-8. The growth characteristics of lettuce treated with solutions developed previous experiment at each stage.

DAT	Treatment ^z	Leaf	Leaf	Leaf	Root	Fresh weight (g)		Dry weight (g)		Water content ^y (%)
		length (cm)	width (cm)		No.	length (cm)	Shoot	Root	Shoot	
0		11.4	4.7	7.0	13.70	1.52	0.25	0.08	0.02	94.5
	0.5S	17.75 a ^x	10.22 b	12.83 a	19.25 b	14.02 a	3.70 a	0.80 a	0.18 a	94.3 b
12	1.0S	15.75 b	9.8 b	12.33 a	13.55 c	10.43 b	2.86 c	0.67 b	0.16 a	93.6 c
	1.5S	18.62 a	11.03 a	13.17 c	22.30 a	15.06 a	3.32 b	0.82 a	0.14 b	94.6 a
	Unchanged, 0.5S	24.22 a	14.50 b	21.83 b	37.95 a	67.65 bc	11.60 ab	4.10 a	0.67 a	94.0 b
	Unchanged, 1.0S	25.53 bc	16.65 a	24.33 a	35.43 ab	82.38 ab	11.19 ab	3.74 ab	0.51 b	95.5 a
	Unchanged, 1.5S	27.98 a	16.25 a	23.67 ab	35.40 ab	89.21 a	10.94 ab	4.06 a	0.50 b	95.4 a
24	Renewed, 0.5S	26.78 ab	14.22 b	22.83 ab	30.62 c	68.49 bc	11.34 ab	3.27 ab	0.61 ab	95.2 a
	Renewed, 1.0S	28.38 a	15.20 b	23.17 ab	39.60 a	77.36 ab	12.58 a	3.73 ab	0.63 ab	95.2 a
	Renewed, 1.5S	28.07 a	14.78 b	23.50 ab	32.52 bc	65.97 c	9.29 b	3.15 b	0.48 b	95.3 a

^z Treated with three concentrations for 12 days after transplanting (DAT), continuously cultured with same solutions for another 12 days (Unchanged) and treated with different composition during 13 to 24 DAT after grown Yamazaki's solution (Renewed).

^y (fresh weight - dry weight)/fresh weight × 100

^x Duncan's multiple range test, p=0.05.

Table 2-9. The relative growth rates (RGR) of lettuce grown with different composition at each stage.

DAT	Treatment ^z	Strength of nutrient solution		
		0.5S	1.0S	1.5S
12		0.224 ^y	0.203	0.215
24	Unchanged	0.091	0.088	0.086
	Renewed	0.089	0.098	0.072

^z See Table 6.

^y $(\ln W_2 - \ln W_1)/t_2 - t_1$,

where W_1, W_2 are dry weight of t_1 and t_2 , respectively.

Table 2-10은 각 단계별 상추의 무기성분 함량과 재배에 사용된 원수(수돗물)의 무기성분 함량을 나타낸 것이다. 생육전기까지 각 성분 모두 생육이 열악했던 1.0배액에서 가장 낮게 나타난 반면 농도가 높았던 1.5배액에서 함량이 높았다. 특히 질산태질소의 경우 1.0배액에서는 1,800ppm이었으나 다른 처리구에서는 3,600~3,800ppm으로 상당히 높게 나타났다. 생육후기까지 연속 재배한 경우에는 각 성분 농도가 낮은 0.5배액에서 대부분 낮게 나타났고 이동성이 낮은 Mg이나 Ca 등은 모두 비슷하였으나 이동성이 빠른 K은 0.5배보다 1.0배 및 1.5배 농도에서 2배 높게 나타났다. 반면 양분이 농도별로 교체하여 재배하였을 경우에는 전반적으로 양액농도가 증가할수록 질산태질소나 인의 함량은 증가하여 질산태질소의 경우 1.5배액에서 4,000ppm 이상으로 유럽에서 규제하는 농도를 벗어난 것으로 나타났다.

수돗물에서는 대부분의 성분이 낮게 나타났으나 칼슘은 20ppm 가까이 함유되어 있어 pH를 높이기 때문에 산도를 조절해야 하는 추가부담을 갖고 있으며, 전체 농도에도 영향을 미치는 것으로 생각된다.

Table 2-10에서 단계별 양액의 n/w 값을 비교해 보면 생육초기에 질산태질소는 각 처리별 8~10me · L⁻¹, Mg은 1.0배 농도 이상에서 1.0me · L⁻¹, P는 2.0~2.7me · L⁻¹, K은 6.5~8.5me · L⁻¹ 및 Ca 2.0~4.0me · L⁻¹ 사이였다. 반면 생육후기에

는 질산태질소와 P 및 K의 경우 0.5배액에서는 변화가 적었으나 그 이상에서는 1.5배~2배 이상 증가했으며 Mg은 오히려 감소하는 결과는 보였다. 생육후기 농도별 변화에서는 질산태질소와 인 및 칼슘의 함량이 높게 나타났다.

생육이 양호한 양액의 농도에서 n/w값은 생육 전기까지 NO_3^- 9.5, Mg 0.5~1.0, P 2.0~2.5, K 6.5~8.0 및 Ca 2.0~4.0 $\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ 이었으며, 이미 구명된 농도 및 조성 과 비교해 보면 K과 NO_3^- 가 월등히 높게 나타났다. 또 생육후기에는 NO_3^- 15.0, Mg 0.5, P 5.0, K 17.0 및 Ca 2.5 $\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 질산태질소와 K을 높게 요구하는 것을 알 수 있다. 이는 계절에 따른 기상변화에 기인된 것으로 생각되며 질산태질소가 높을수록 체내 함량도 증가하기 때문에 이의 검증이 필요할 것으로 생각된다.

Table 2-10. The mineral concentrations of lettuce and tap water.

DAT	Treatment ^z	NO_3^-	Mg	$\text{PO}_4\text{-P}$	K	Ca
		$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1},$ FW		$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}, \text{DW}$		
0		1748.5	1.55	5.22	81.67	9.52
12	0.5S	3605.8 a ^y	2.43 a	7.20 b	86.89 a	11.85 a
	1.0S	1800.6 b	2.01 b	5.31 c	79.55 b	10.36 b
	1.5S	3821.3 a	2.52 a	8.68 a	88.79 a	12.00 a
24	Unchanged, 0.5S	1258.8 c	2.38 a	3.61 e	50.66 c	8.46 c
	Unchanged, 1.0S	3601.3 b	2.37 a	8.44 a	104.48 a	11.00 ab
	Unchanged, 1.5S	3527.5 b	1.95 c	7.35 cd	100.58 ab	10.63 b
	Renewed, 0.5S	3340.8 b	2.18 b	6.99 d	99.13 b	11.72 a
	Renewed, 1.0S	3738.3 b	2.04 bc	7.70 bc	103.62 ab	11.29 ab
	Renewed, 1.5S	4345.5 a	2.13 b	8.22 ab	103.50 ab	11.75 a
Tap water ^x		8.1	3.80	- ^w	3.30	19.7

^z See Table 6.

^y Duncan's multiple range test, p=0.05.

^x ppm

^w Not detected.

Table 2-11. The n/w value of nutrient solution calculated by Yamazaki's formula.

DAT	Treatment ^z	NO ₃ ⁻	Mg	PO ₄ -P	K	Ca
		<i>me · L⁻¹</i>				
12	0.5S	9.28	0.54	1.97	6.67	2.13
	1.0S	8.36	1.04	2.40	7.33	2.58
	1.5S	9.93	1.09	2.72	8.32	3.91
24	Unchanged, 0.5S	8.58	0.95	0.81	3.45	1.95
	Unchanged, 1.0S	15.04	0.68	3.94	10.77	2.21
	Unchanged, 1.5S	15.03	0.46	5.29	17.06	2.40
	Renewed, 0.5S	17.39	0.94	3.18	10.92	2.96
	Renewed, 1.0S	15.96	0.66	4.22	11.75	3.03
	Renewed, 1.5S	11.51	0.60	4.38	9.22	3.45

^z See Table 6.

2) 생육단계별 체내 질산태질소와 비타민 C 함량의 변화

Fig. 2-15는 재배시 양액의 pH와 EC를 나타낸 것으로 Yamazaki 처방액에서 생육 중기에 pH가 갑자기 감소했다가 서서히 증가하는 양상을 보였으며 EC는 꾸준히 감소하였다. 반면 저농도 처리구에서는 양액 갱신 전까지 pH는 일정하게 유지되다가 갱신 후 갑자기 떨어진 후 다시 급격히 증가하는 불안정한 변화를 보였다. EC에서도 갱신 전이나 갱신 후 모두 조금씩 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 2-16에 액온과 기온 및 기상조건을 나타냈다. 액온은 최대, 최소 모두 두처리 유사하게 나타났으며, 기온의 변동에 따라 1시간 정도 늦게 변화하였다. 생육전기에는 구름이 끼거나 강설이 많아 광도가 낮았으며 이에 따라 습도도 높게 유지되었다.

단계별 생육(Table 2-12)을 보면 두 처리간 기간 경과에 따른 차이는 크지 않았지만 전반적으로 Yamazaki 처방액에서 약간 양호한 생육을 나타냈다. 특히 지상부 생체중은 15일째까지 서로 비슷하였으나 18일째 유의적으로 감소하다 21일부

터 수확기까지 생육이 역전되는 현상을 보였다. 건물중(Table 11)에서도 생육중기까지는 유의적인 차이를 나타내지 않다가 수확기에 Yamazaki 처방액에서 월등한 생육을 보였다. 함수량의 변화는 생육초기보다 생육후기에 약간 증가하는 경향을 보였고, 상대생장률은 6~15 DAT에서 가장 높았다가 다시 감소하는 경향을 나타냈다.

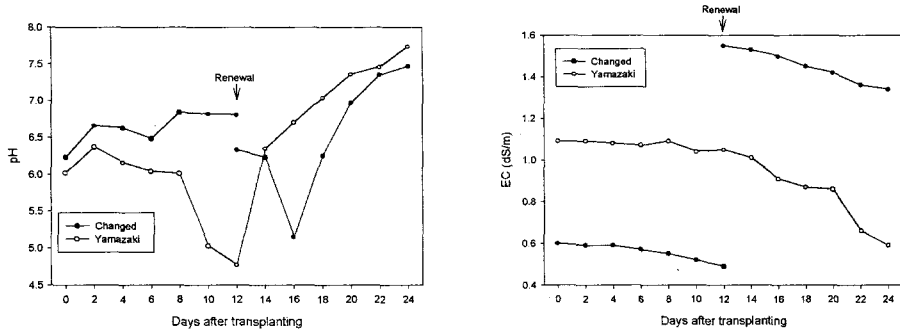


Fig. 2-15. The pH and EC fluctuation of nutrient solutions.

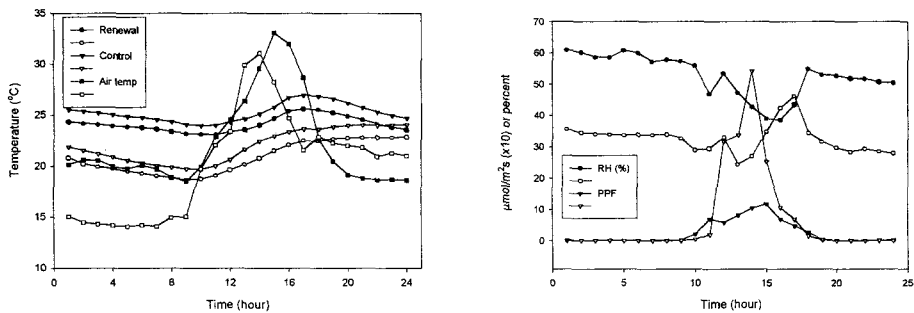


Fig. 2-16. The maximum (black) and minimum (open) temperature of air or nutrient solution and RH and PPF.

Table 2-12. The growth changes of lettuce grown different concentration of nutrient solution according to stages.

DAT	Treatment ^z	Leaf length	Leaf width	Leaf No.	Root length	Fresh weight (g)	
		(cm)	(cm)		(cm)	Shoot	Root
3	A	10.03 b ^y	5.0 a	7.3 a	13.63 a	1.90 a	0.52 a
	B	9.53 a	5.1 a	7.0 a	12.30 a	1.83 a	0.49 a
6	A	11.67 a	6.3 a	8.0 a	12.93 a	4.03 a	1.07 a
	B	12.00 a	6.7 a	8.3 a	13.70 a	4.46 a	1.20 a
9	A	15.00 a	9.3 a	10.0 a	18.87 a	9.26 a	1.93 a
	B	15.67 a	9.0 a	11.0 a	15.77 a	10.37 a	2.01 a
12	A	19.30 a	11.7 a	13.0 a	24.80 a	20.35 a	3.38 a
	B	18.30 a	11.0 a	14.0 a	18.60 b	20.70 a	3.19 a
15	A	20.67 a	13.0 a	19.8 a	35.60 a	36.10 a	5.42 a
	B	21.67 a	13.0 a	18.7 a	26.70 a	38.29 a	5.58 a
18	A	24.67 a	14.3 a	22.7 a	39.63 a	69.17 a	8.97 a
	B	23.67 a	13.7 a	21.7 a	33.27 a	59.04 b	8.33 a
21	A	28.27 a	16.5 a	24.7 a	37.60 a	90.54 a	11.48 a
	B	27.37 a	16.0 a	25.7 a	33.83 a	99.51 a	11.78 a
24	A	30.27 a	17.6 a	30.3 a	34.27 a	152.68 b	18.60 a
	B	30.60 a	17.0 a	31.0 a	49.50 a	163.13 a	22.27 a

^z A = treated with half strength of stage I solution for 12 DAT and sequentially one strength of stage II solution for 12 days.

B = control, treated with Yamazaki's solution for 24 DAT.

^y Duncan's multiple range test, p=0.05.

Table 2-13. The growth changes of lettuce grown different concentration of nutrient solution according to stages.

DAT	Treatment ^z	Dry weight (g)		Water content (%)	RGR
		Shoot	Root		
3	A	0.11 a ^y	0.030 a	94.02 a	0.196
	B	0.11 a	0.028 a	93.97 a	0.186
6	A	0.21 b	0.053 a	94.70 a	0.210
	B	0.25 a	0.060 a	94.36 b	0.275
9	A	0.46 a	0.100 a	95.08 a	0.252
	B	0.52 a	0.097 a	95.00 a	0.240
12	A	0.95 a	0.160 a	95.34 a	0.245
	B	0.97 a	0.157 a	95.32 a	0.208
15	A	1.76 a	0.270 a	95.14 a	0.205
	B	1.87 a	0.290 a	95.11 a	0.220
18	A	3.15 a	0.430 a	95.45 a	0.194
	B	2.79 a	0.420 a	95.28 a	0.132
21	A	4.05 a	0.550 a	95.52 a	0.085
	B	4.39 a	0.570 a	95.58 a	0.151
24	A	6.86 a	0.876 b	95.51 a	0.175
	B	7.68 a	1.060 a	95.30 a	0.186

^z A = treated with half strength of stage I solution for 12 DAT and sequentially one strength of stage II solution for 12 days.

B = control, treated with Yamazaki's solution for 24 DAT.

^y Duncan's multiple range test, p=0.05.

상추 체내 총 및 산화형 ascorbic acid 함량 변화와 비율을 보면(Fig. 2-17), 총 ascorbic acid는 생육초기에 약간 감소하다 증기에 증가하지만 다시 후기에 현저히 감소하는 경향을 보였고, 일반적으로 Yamazaki 처리구에서 높게 나타났다. 그리고 산화형 ascorbic acid는 두 처리 모두 약간 증가하다 감소하는 경향을 보였

으며 처리간 차이는 없었다. 총 ascorbic acid에 대한 산화형의 비율을 보면 생육 초기에 갱신 처리구에서 약간 높았다가 생육중기(15 DAT)에 대조구에서 증가하다 다시 21 DAT 이후에 교차되는 양상을 보였다. 일반적으로 총 ascorbic acid에 대한 산화형의 비율은 채소의 종류나 재배환경에 따라 많이 다르지만 대략 25~30% 수준으로 가역적이며 활성 산소를 제거해 주기 때문에 스트레스를 많이 받게 되면 일시적으로 산화형 ascorbic acid 함량이 증가하게 된다. 한편 Fig. 2-18에서는 갱신 처리구에서 질산태질소가 꾸준히 증가하여 수확기에 Yamazaki 처방액에서는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 따라서 생육초기에 저농도로 재배하다 생육 후기 적정 수준으로 양액 농도를 유지하는 것이 체내 질산태질소 함량은 줄이면서 ascorbic acid 함량을 높이는 방법으로 생각된다.

그리고 부위별 함량(Table 2-14)을 보면 바깥쪽 잎보다 안쪽의 새로 발생하는 어린 잎 부위에서 총 및 산화형 ascorbic acid 함량이 3배 가까이 높았고, 질산태질소 함량도 1,000ppm 가까이 낮았다. 따라서 너무 큰 잎을 수확하는 것보다 적당히 전개한 잎을 수확하는 것이 품질을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

Table 2-15에 양액의 n/w 값을 나타내었다. 생육에 따라 Mg과 Ca은 큰 변화를 보이지 않았으나 P과 K는 생육후기에 1.5~2배 증가하는 경향을 보였다. 성분별로 보면 NO_3^- 10.0~12.0, Mg 1.0~1.5, P 2.5~4.0, K 7.0~12.0 및 Ca 2.0~2.5me · L⁻¹로 Table 8에서와 유사하게 나타났다

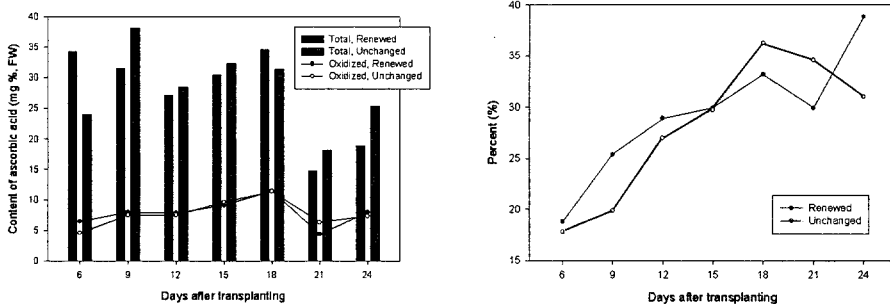


Fig. 2-17. The concentration of ascorbic acid and percent of oxidized form over total ascorbic acid of lettuce.

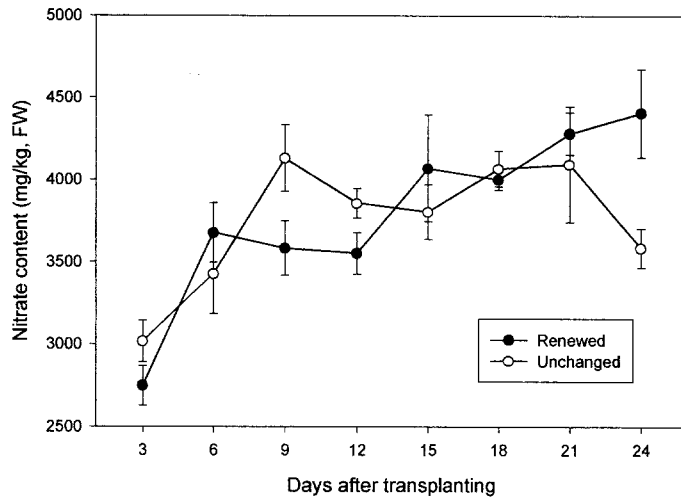


Fig. 2-18. The changes of nitrate content of lettuce as nutrient concentration was changed to each growth stage.

Table 2-14. The ascorbic acid content of lettuce at 24 DAT.

Part ^z	Ascorbic acid (mg %, FW)			Nitrate (mg · kg ⁻¹ , FW)
	Total (a)	Oxidized (b)	Percent (b/a × 100)	
Inner leaves	33.00 a	9.33 a	28.3 a	4405.3 a
Outer leaves	10.00 a	3.33 b	35.0 a	3584.6 b

^z Inner leaves were sampled at 20th or 21st position around youngest leaves and outer leaves from 4th to 6th position.

^y Duncan's multiple range test, p=0.05.

Table 2-15. The n/w value of nutrient solution calculated by Yamazaki's formula in EXP 2.

DAT	Treatment ^z	NO ₃ ⁻	Mg	PO ₄ -P	K	Ca
		<i>me · L⁻¹</i>				
12	A	12.41	1.40	2.41	7.11	2.26
	B	10.70	0.87	3.17	7.78	2.04
24	A	- ^y	0.91	4.32	12.00	2.63
	B	-	0.95	4.25	12.38	2.38

^z See Table 10.

^y Not analyzed.

3) 상추 단근과 양액농도에 따른 체내 ascorbic acid 및 질산태질소 함량의 변화

재배기간동안의 pH와 EC를 Fig. 2-19에 나타내었다. Yamazaki 처방액에서 pH는 세 처리 모두 비슷하였으나 생육후기에 대조구에서만 계속 증가했지만 단근 처리구는 약간 감소하였다. 양액갱신 처리구에서도 생육중기 이후에 단근시 변화가 크게 나타났다. 단근에 따른 EC 변화는 적었으며 오히려 양액 갱신 유무에 따라 크게 나타났으며 모든 처리에서 꾸준히 감소하는 경향을 보였다.

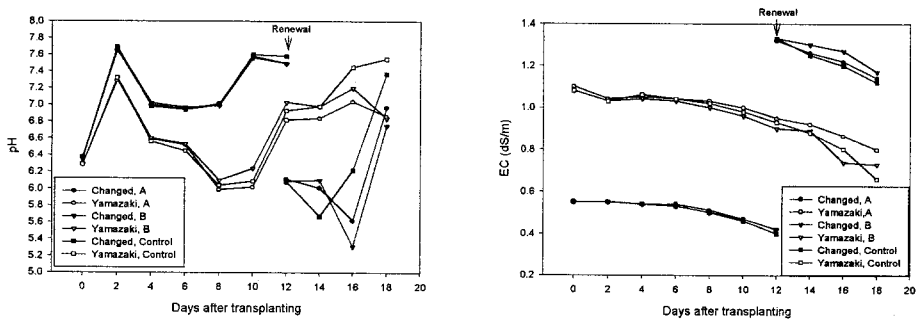


Fig. 2-19. The pH and EC fluctuation of nutrient solution treated with Yamazaki's and optimized solution according to growth stages. In legends, A means cutting root at every 3 day after transplanting and B means cutting at 12 DAT, by the level of 2.5cm below ground.

수확 전 3일간의 연속적인 양액온도와 기상 조건에서 보면(Fig. 2-20) Yamazaki 처방액의 액온이 갱신처리구보다 약간 낮은 경향을 보였으며, 외기에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 광도가 증가하면 공중 습도는 낮아졌다가 광도가 낮아지면 증가하는 반대의 경향을 보였다.

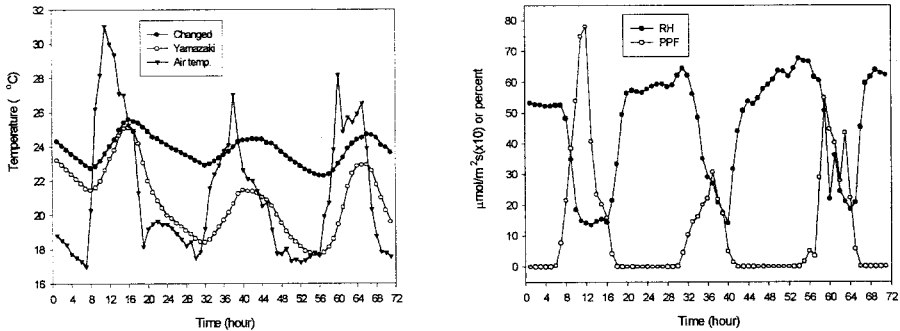


Fig. 2-20. Temperature changes of nutrient solution, RH and PPF for 3 days (May 13~15, 1999) before harvest.

각 단계별 생육(Table 2-15, 2-16)에서 12 DAT에서는 단근이나 양액에 따른 생육 차이는 나타나지 않았다. 반면 18일째에는 단근에 따른 생육차이가 크게 나타나 대조구보다 모두 생육이 감소하는 경향을 보였다. 특히 강단근보다는 약단근에서 생육이 열악했는데, 이는 생육초기부터 꾸준히 단근을 하면 지상부 생육에 따른 양수분 흡수를 조절할 수 있는데 반해, 생육이 왕성한 중기에 단근처리를 하면 갑자기 양수분 흡수에 영향을 받게 되므로 위조현상과 함께 생육이 감소한 것으로 생각된다. 그리고 수확시 수분함량은 대조구에서 가장 높고 단근 처리에서 감소하여 단근에 따라 양수분 흡수에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 2-15. The Effects of root cutting and nutrient renewal according to stages on the growth of lettuce.

DAT	Treatment ^z	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	No. of leaves	Root length (cm)
0		8.70	3.9	5.3	9.70
12	Yamazaki, A	18.00 a ^y	11.60 a	14.0 a	11.30 a
	Changed, A	17.03 a	11.10 a	15.3 a	8.57 a
	Yamazaki, B	17.63 a	11.23 a	14.0 a	25.57 a
	Changed, B	18.50 a	11.63 a	14.3 a	19.83 a
18	Yamazaki, A	22.30 bc	14.27 abc	23.3 a	7.93 d
	Changed, A	21.10 bc	14.43 abc	22.7 ab	8.10 d
	Yamazaki, B	21.60 c	13.43 c	21.3 ab	19.87 c
	Changed, B	20.97 c	13.87 bc	22.3 ab	19.13 c
	Yamazaki, Control	25.50 a	15.87 a	20.7 b	26.40 b
	Changed, Control	23.60 ab	15.43 ab	22.3 ab	36.00 a

^z Yamazaki = treated with Yamazaki's solution of lettuce for 24 days cotinuously without nutrient renewal,

Changed = treated with nutrient solution according to stage I (12 days) and II (another 12 days),

A = cutting root at every 3 day by the level of 2.5 cm beneath ground,

B = control, without cutting root.

^y Duncan's multiple range test, p=0.05.

Table 2-16. The Effects of root cutting and nutrient renewal according to stages on the growth of lettuce.

DAT	Treatment ^z	Freshweight		Dry weight		Water content (%)	RGR
		(g)		(g)			
		Shoot	Root	Shoot	Root		
0		1.00	0.206	0.060	0.010	94.05	-
12	Yamazaki, A	21.28 a ^y	3.92 a	1.12 a	0.200 a	94.74 a	0.244
	Changed, A	20.51 a	4.15 a	1.16 a	0.234 a	94.35 b	0.247
	Yamazaki, B	19.05 a	4.44 a	1.01 a	0.237 a	94.72 a	0.235
	Changed, B	22.81 a	5.33 a	2.27 a	0.249 a	94.89 a	0.248
18	Yamazaki, A	62.57 ab	7.38 d	3.03 a	0.420 a	95.16 b	0.218
	Changed, A	64.79 ab	8.43 cd	3.37 a	0.493 a	94.81 c	0.244
	Yamazaki, B	58.93 b	10.94 abc	2.94 a	0.563 a	95.01 bc	0.216
	Changed, B	63.34 ab	8.85 bcd	3.20 a	0.477 a	94.94 bc	0.221
	Yamazaki, Control	72.49 ab	11.42 ab	3.19 a	0.508 a	95.06 a	0.221
	Changed, Control	77.73 a	12.68 a	3.33 a	0.537 a	95.72 a	0.223

^z See table 2-15.

^y Duncan's multiple range test, p=0.05.

상대생장률은 생육후기보다 생육전기에 더 높게 나타나 건물축적은 생육중기까지 많이 이루어지고 생육후기에는 수분흡수가 증가하게 되는 것으로 생각된다.

양액의 농도에 따른 성분별 n/w 값(Fig. 2-21)은 다양하게 나타났는데, 12 DAT에서 Mg과 K은 일정한 반면 Ca은 Yamazaki 처방액에서 단근 강도가 강할수록 높아지는 경향을, P은 약간 감소하는 경향을 보였고, 갱신 처리구에서는 P만 감소하는 경향을 보였다. 18 DAT에서는 Mg과 Ca는 일정한 반면 Yamazaki 처방액에서 강단근에서 K과 P이 증가하였고, 갱신 처리구에서는 반대의 경향을 보였다. 따라서 단근에 따라 뿌리의 수분 흡수 특성이 달라지고 양분의 흡수도 상당히 달라

지는 것을 알 수 있다

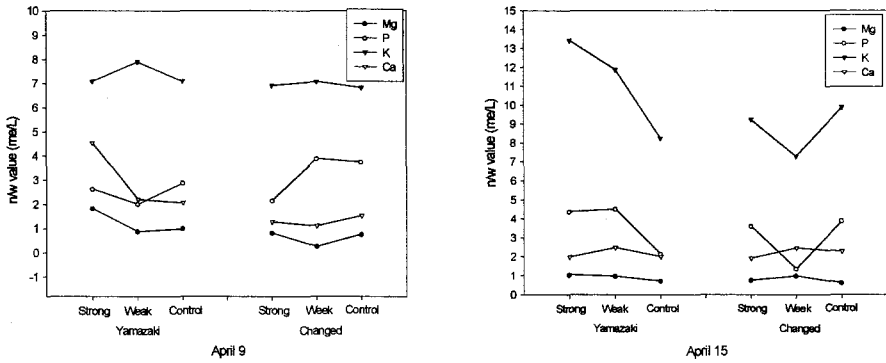


Fig. 2-21. The n/w values calculated by Yamazaki's formula of nutrient solution.

총 및 산화형 ascorbic acid 함량(Table 2-17)은 12일째까지 유의적인 차이를 나타내지 않았으나 생육 초기에 총 ascorbic acid 함량이 높았다가 생육후기에 점차 감소하는 경향을 보였고(Table 2-18), 질산태질소 함량도 생육중기에 높아지다 후기에 약간 감소하는 경향을 보였다. 생육 중기의 ascorbic acid 함량은 강단근, 양액갱신 처리구였으며, 이 때의 질산태질소 함량도 약간 감소하였다. 생육 후기에는 양액갱신 대조구에서만 총 ascorbic acid 함량이 유의적으로 낮았고 질산태질소 함량은 가장 높았다. 그리고 갱신 강단근 처리구에서 총 ascorbic acid은 높으면서 질산태질소 함량은 유의적으로 낮게 나타나 품질이 높은 상추를 생산할 수 있을 것으로 생각된다.

Table 2-17. The content of ascorbic acid and nitrate of lettuce on 0, 6 and 12 DAT.

DAT	Treatment ^z	Ascorbic acid (mg %, FW)		Percent	Nitrate
		Total (a)	Oxidized (b)	(b/a × 100)	(ppm, FW)
0		34.99 a ^y	4.96 a	14.38 a	2001.5 a
6	Yamazaki, A	57.41 a	5.90 a	10.28 a	2249.2 a
	Changed, B	57.71 a	6.97 a	12.09 a	2291.6 a
12	Yamazaki, A	34.80 a	8.89 a	25.72 a	3327.4 a
	Changed, A	38.45 a	7.07 a	18.81 a	3684.6 a
	Yamazaki, B	35.50 a	8.01 a	22.56 a	3990.8 a
	Changed, B	33.22 a	7.57 a	23.12 a	3813.0 a

^z See Table 2-15.

^y Duncan's multiple range test, p=0.05.

Table 2-18. The content of ascorbic acid and nitrate of lettuce on 18 DAT.

DAT	Treatment ^z	Ascorbic acid (mg %, FW)		Percent	Nitrate
		Total (a)	Oxidized (b)	(b/a × 100)	(ppm, FW)
18	Yamazaki, A	28.28 a	6.67 a	23.51 bc	3042.1 b
	Changed, A	28.61 a	7.33 a	25.52 abc	2164.0 c
	Yamazaki, B	28.16 a	6.35 a	22.51 c	3112.2 b
	Changed, B	28.25 a	6.89 a	24.50 abc	2375.1 c
	Yamazaki, Control	26.20 ab	7.16 a	27.54 ab	3679.1 a
	Changed, Control	21.02 b	6.08 a	29.21 a	3797.9 a

^z See Table 2-15.

^y Duncan's multiple range test, p=0.05.

4) 수확전 양액 조정에 따른 질산태질소 저감과 ascorbic acid 함량 증대

Fig. 2-22에서 pH의 변화는 양액조정 시작후 대조구와 TW, B 처리구는 일정한 것에 반해 TW, A에서 약간 저하하였고, DW에서는 급격히 감소하였다. 따라서 ascorbate가 포함된 양액의 pH는 질산태질소의 유무에 따라 크게 영향을 받으며

로 ascorbate 흡수에 질산태질소가 영향을 하는 것으로 생각된다.

EC는 pH와 반대로 나타나 증류수에 조정양액을 혼합하고 NaAs를 첨가한 것에서 급격히 증가하였다.

생육(Table 2-19)은 처리전 단근 처리구에서 약간 감소하였고, 수분함량도 저하하는 경향을 보였다. 그러나 처리 후에는 DW는 대조구와 유사한 생육을 보였고, TW, A나 TW, B에서 생육이 열악하였다. 그러나 총 ascorbic acid 함량(Table 2-19)은 처리간 유의적인 차이는 없었으나 DW 및 TW, A에서 높았고 TW, B에서 가장 낮았다. 이 결과는 외생 ascorbic acid 1,000 및 2,000ppm이 포함된 용액에 수확전 24시간동안 침지한 상추에서 대조구에 3.5배 및 4.7배 증가하였다는 井上 등(1995)의 보고와 일치하였다. 반면 고농도 처리는 뿌리가 갈변하고 이취가 나는 등의 부작용이 있어 침지에 따른 방법은 더 검토해야 할 것으로 생각된다. 한편 질산태질소는 처리전 단근 처리시 유의적으로 감소하였고, 처리 후에도 대조구에서 가장 높은 반면 총 ascorbic acid 함량은 가장 낮은 결과를 보였다.

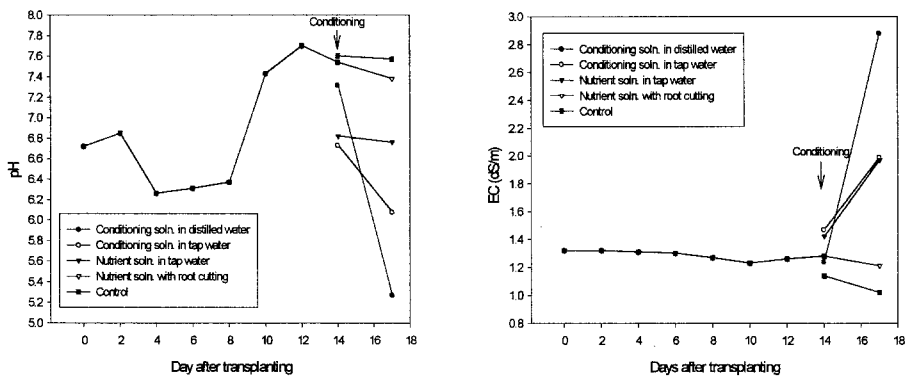


Fig. 2-22. The pH and EC of nutrient solution before or after conditioning for 3 days.

Table 2-19. The conditioning effect of nutrient solution for 3 days before harvest on lettuce growth.

Conditioning period	Treatment ^z	Leaf No.	Freshweight (g)		Dry weight (g)		No. of leaves	Water content (%)
			Shoot	Root	Shoot	Root		
0	Cutting root	24.7 a ^y	70.13 a	9.14 b	4.61 a	0.591 b		93.43 b
	Control	24.0 a	82.80 a	14.78 a	4.60 a	0.731 a		94.45 a
3	DW	26.0 b	91.98 b	15.47 ab	6.20 a	0.900 ab	4.0 a	93.26 c
	TW, A	23.3 c	72.26 b	12.72 b	5.06 b	0.737 b	3.3 a	93.64 bc
	TW, B	24.7 bc	79.47 b	12.38 b	4.87 b	0.721 b	3.3 a	93.88 b
	Control	28.7 a	129.9 ₉ a	28.39 a	6.19 a	0.927 a	2.3 b	95.24 a

^z Cutting root = cut root every 3 day by the level of 2.5 cm beneath ground, Control = without root cutting, DW = conditioning solution in distilled water, TW, A = conditioning solution in tap water, TW, B = nutrient solution in tap water, solution of DW, TW A and B contains NaAs 500ppm.

^y Duncan's multiple range test, p=0.05.

Table 2-20. The content of ascorbic acid and nitrate of lettuce before or after conditioning of nutrient solution.

Conditioning period	Treatment ^z	Content of total	Nitrate content
		ascorbic acid (mg %, FW)	(mg · kg ⁻¹ , FW)
0	Cutting root	37.54 a ^y	2385.0 b
	Control	33.67 a	3411.8 a
3	Distilled water	32.40 a	2010.7 c
	Tap water, A	32.84 a	2081.4 c
	Tap water, B	29.87 a	2402.4 b
	Control	26.67 a	3528.6 a

^z See Table 2-19.

^y Duncan's multiple range test, p=0.05.

이상의 결과로부터 단근 처리에 따라 뿌리의 양수분 흡수를 억제시켜 스트레스를 부여하므로써 지상부 생육을 좀 더 compact하게 제어하여 수확시 handling을 양호하게 할 수 있었으며, 총 ascorbic acid 및 질산태질소 함량도 유의적으로 낮출 수 있었다.

그러나 단근에 따른 양수분 흡수 특성이 어떻게 변화하는지, 그리고 다른 성분에 어떠한 영향을 미치는지 더 구명되어야 할 것이며, 식물공장적 생산방식에 이를 합리적으로 도입하기 위해선 단계별, 처리별로 각 성분 함량의 정량화가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

5) 양액조정에 따른 sodium ascorbate의 엽면시비 효과

수확전 3일간 sodium L-ascorbate 1,500~3,000ppm 용액을 엽면 살포하면서 조정된 양액의 처리 전·후 pH와 EC를 Fig. 2-23에 나타내었는데, 증류수에 sodium ascorbate를 넣어 뿌리를 침지한 처리구에서만 급격히 pH가 감소하였고, 다른 처리에서는 그대로이거나 0.3 정도 증가하는 경향을 보였다. 그리고 EC에서는 무처리 양액에서는 변화가 거의 없었으나 Cl로 대체한 양액에서 0.1 정도 감소하여 양분의 흡수가 약간 이루어졌음을 암시하였다. 수확전 일정기간 sodium ascorbate를 상추에 혼입시키는 방법으로서의 양액의 pH나 EC가 거의 변하지 않아야 작기마다 연속적으로 사용할 수 있기 때문에 C 처리와 같이 양액에 sodium ascorbate를 첨가하는 경우는 변화가 심해 검토해야 할 필요성이 있다. 특히 양액에 sodium ascorbate를 첨가할 경우 효율적인 흡수를 위해 pH를 낮춰줘야 하는데, 그 이유로 井上 等(1993)의 보고에서처럼 pH 7보다 4의 처리액 쪽이 sodium ascorbate가 양상추나 상추에 많이 흡수된 반면 pH 4 이상에서는 수소이온의 직접장해가 발생하기 때문이라고 한다.

상추의 생육(Table 2-21)을 보면 엽수(고엽수)는 차이가 없었으나 생체중은 대조구에서 가장 높았고, 증류수에서 가장 낮았다. 특히 대조구와 양액 조정구는 유의적인 차이가 적어 생육이 유사함을 알 수 있고, 건물중에서도 생체중과 유사한 경향을 나타냈다. 짧은 기간이지만 질소가 식물 생육에 절대적으로 영향하고 있음

을 알 수 있다. 3,000ppm의 sodium ascorbate 엽면시비 처리는 1,500ppm 처리구와 비교해 생체중과 건물중이 큰 차이를 나타내지 않았다.

반면 수분함량(Table 2-22)은 대조구와 증류수 처리에서 가장 낮았고, 조정구 및 무조정구간에는 차이가 없었으며 3,000ppm 엽면 시비구에서 가장 높았다. 질산태질소의 함량도 유사한 경향을 보여 수분함량이 비교적 높은 구에서 높게 나타났고 질소가 전혀 없는 양액 조정구에서 가장 낮게 나타났다. 증류수에 sodium ascorbate를 처리한 구에서는 양액 조정구보다 낮아지지 않은 것으로 보아 양액조정구에서 다른 무기성분들을 흡수하여 체내 질산태질소의 대사가 활발히 진행되고 엽포나 줄기에 있는 여분이 소모되는 것으로 생각된다. Ascorbic acid 함량은 대조구에서 가장 낮고 엽면시비 및 침지 처리구에서 높게 나타났으며, 살포 농도가 높을수록 흡수도 증가한 것으로 생각된다. 뿌리 침지시 ascorbic acid 함량이 증가한 것은 1,500ppm의 sodium ascorbic acid가 포함된 양액에 상추와 파를 12시간 침지한 경우 pH가 낮은 처리구에서 5.4~7.3배 증가하였다(Inoue et al., 1997)는 보고와 일치한다. 처리 방법에 있어서는 엽면살포와 뿌리침지가 유의적인 차이를 보이지 않아 어느 방법으로도 체내 ascorbic acid 함량을 높일 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 양액에 혼합하게 되면 양액의 색깔이 탁해지고 이취가 나는 단점이 있고 장기간 보존, 사용이 어려울 것으로 생각되어 엽면시비가 더 효과적일 것이다.

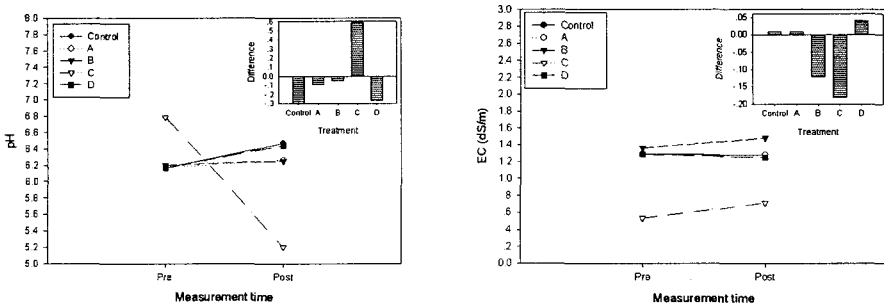


Fig. 2-23. The pH and EC of nutrient solution before or after conditioning for 3 days.

Table 2-21. The growth of lettuce treated with foliar spray of sodium L-ascorbate and conditioning of nutrient solution during 3 days before harvest.

Treatment	Nutrient solution. ^z	Conct. of sodium L-ascorbate ^y	No. of dead leaves	No. of total leaves	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Control	Normal	-	2.8a ^x	24.8a	66.09a	3.16a
A	Normal	1500 FS	2.0a	23.6a	61.73a	2.77ab
B	Conditioning	1500 FS	2.8a	24.0a	58.13ab	2.57ab
C	Distilled water	1500 DR	2.8a	23.0a	49.35b	2.32b
D	Normal	3000 FS	3.0a	24.4a	57.53ab	2.45b

^z Normal : Yamazaki's fomula + KNO_3 $2 \text{ me} \cdot \text{L}^{-1}$, Conditioning : NO_3^- is substituted for Cl^- ,

^y FS : foliar spray, DR ; drenching of roots.

^x Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

Table 2-22. The percent of water content, nitrate and ascorbic acid content of lettuce treated with foliar spray of sodium L-ascorbate and conditioning of nutrient solution during 3 days before harvest.

Treatment	Nutrient soln. ^z	Conct. of sodium L-ascorbate ^y	Water content(%)	Nitrate content ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, FW)	Total ascorbic acid content (mg %, FW)
Control	Normal	-	95.26b ^x	4016.2a	17.08c
A	Normal	1500 FS	95.54 a b	3805.0a	22.57b
B	Conditioning	1500 FS	95.60 a b	2461.3c	23.97b
C	Distilled water	1500 DR	95.32b	3217.3b	23.54b
D	Normal	3000 FS	95.75a	3958.9a	29.83a

^z Normal : Yamazaki's fomula + KNO_3 $2 \text{ me} \cdot \text{L}^{-1}$, Conditioning : NO_3^- is substituted for Cl^- ,

^y FS : foliar spray, DR ; drenching of roots.

^x Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

Table 2-23과 2-24은 질소 농도별로 생육과 체내 ascorbic acid 및 질산태질소 함량을 살펴 본 것이다. 엽수나 지상부 생체중은 질소 농도에 따른 영향이 없었으나 지하부 생육반응은 다르게 나타나 근장은 4 및 12me · L⁻¹ NO₃⁻ 공급구에서 가장 길었고 뿌리 생체중은 반대로 오히려 감소하는 경향을 나타냈다. 대조구는 8me · L⁻¹ NO₃⁻에 1.5me · L⁻¹ · NH₄⁺가 더 추가된 처리구로 다른 처리구보다 생육이 좋을 것으로 기대했으나 건물중에서 약간 우세한 생육을 보였을 뿐 지상부 생체중은 오히려 감소하였다. 체내 함량에 있어서도 ascorbic acid는 산화형 및 환원형 모두 유의적인 차이는 없었지만 대조구와 N-4구에서 높게 나타났고 질산태질소는 감소하는 경향을 보여 질소농도에 따른 체내 ascorbic acid 함량의 영향은 없었다.

한편 Mozafar(1993)는 보고된 연구들을 통해 질소시비 수준에 따른 체내 비타민류의 상관정도를 비교하였는데, 종에 따라 상당히 다양한 반응을 보였고 대부분은 질소가 많을수록 감소하였으나 상추의 경우 질소 농도가 높을수록 체내 ascorbic acid와 carotene 함량은 증가하는 것으로 보고하였다. 본 실험에서는 약간 상이한 결과를 보였으나, 일반적으로 생육이 양호할수록 광합성 효율이 증가하고 더불어 당이나 탄수화물 함량이 높아지면 ascorbic acid 함량도 증가할 것으로 생각된다.

Table 2-23. The effect of three concentrations of nitrate in nutrient solution on the growth of lettuce at harvest.

Treatment	No. of leaves	Root length (cm)	Fresh weight(g)		Dry weight(g)	
			Shoot	Root	Shoot	Root
Control	23.0a ^z	25.70c	48.37a	7.25ab	3.368a	0.810a
N-4	21.7a	60.43a	52.24a	6.41bc	2.915b	0.715b
N-8	21.7a	45.10b	52.03a	7.04a	2.976b	0.732b
N-12	21.3a	50.13ab	54.12a	6.09c	3.132ab	0.797a

^z Duncan's multiple range test, p=0.05.

Table 2-24. The effect of three levels of nitrate concentration in nutrient solution on the contents of ascorbic acid and nitrate of lettuce at harvest.

Treatment	Ascorbic acid(mg %, FW)			Nitrate (mg · kg ⁻¹ , FW)
	DHAA	AA	Total	
Control	9.657a ^z	24.847a	34.503a	2291.0c
N-4	6.990a	26.597a	33.583a	2807.2bc
N-8	5.620a	23.783a	29.403a	3477.6a
N-12	6.220a	22.060a	28.280a	3306.5ab

^z Duncan's multiple range test, p=0.05.

6) Sodium ascorbate의 처리시기와 농도가 상추 품질에 미치는 영향

Sodium ascorbate의 처리시기별 체내 함량의 변화를 살펴보기 위해 3,000ppm의 sodium ascorbate 용액을 엽면 시비하여 24시간 뒤의 함량을 Table 2-25에 나타내었다. 처리 시기별로 생체중과 건물중은 유의적인 차이를 나타내지 않아 생육에는 영향을 미치지 않은 반면, 총 ascorbic acid 함량은 대조구에서 가장 낮고 다른 처리구에서는 비슷한 경향을 보여 시기별 영향은 없었다. 따라서 어느 시기에 살포하더라도 엽중 함량에는 영향이 없고 살포 농도가 크게 좌우하는 것으로 생각된다.

엽면시비의 최적 농도를 알아보기 위해 2,500~10,000ppm으로 엽면 시비하였을 때에도 생육은 큰 차이를 보이지 않고 대조구와 유사한 경향을 보이고 질산태질소 함량도 차이가 없었던 반면 산화형, 환원형 및 총 ascorbic acid 함량은 살포농도가 높을수록 증가하는 양상을 보였다(Table 2-26). 특히 10,000ppm 처리시 대조구보다 355% 증가하였고, 2,500ppm만 처리하더라도 160%가 증가하여 저농도 살포만으로도 효율적으로 체내 함량을 크게 높일 수 있을 것으로 생각된다.

한편 흡수된 ascorbic acid의 이동성을 보기 위해 동일한 개체의 반쪽에 살포한 것과 나머지 살포하지 않은 반쪽의 엽중 함량(Table 2-27)을 살펴보면 환원형만 유의적으로 차이날 뿐 총 함량에 있어서는 영향이 없었지만 살포하지 않은 잎에서 약간 적게 나타나 다른 부위로 쉽게 이동하더라도 시간이 약간 걸릴 것으로

생각된다. 따라서 잎 주위에 소량으로 처리하더라도 일정량과 농도로 엽면 살포하면 효과적으로 엽중 함량을 높일 수 있을 것이다.

Table 2-25. The effect of spray time of sodium L-ascorbate(3,000 ppm) on growth and ascorbic acid content in lettuce leaves at 24 hours after spray.

Spray time	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Total ascorbic acid (mg %, FW)
Control	29.970a ^z	1.608a	39.858b
09:00	32.683a	1.740a	63.915a
14:00	30.520a	1.655a	63.483a
20:30	29.205a	1.665a	62.190a

^z Duncan's multiple range test, p=0.05.

Table 2-26. The effect of concentration of sodium L-ascorbic acid for foliar spray of lettuce during 3 days before harvest.

Conc. of sodium L-ascorbate	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Nitrate content (mg · kg ⁻¹ , FW)	Ascorbic acid(mg %, FW)			Ratio (a/b, %)
				DHAA (a)	AA	Total (b)	
Control	85.92a ^z	5.463a	2253.7a	19.26c	34.67c	53.92c	35.79a
2,500	93.43a	5.887a	2394.4a	24.62bc	61.53b	86.15bc	28.46bc
5,000	80.45a	5.198a	2367.0a	35.03b	78.03b	113.06b	30.76b
10,000	83.24a	5.376a	2370.5a	49.40a	142.08a	191.47a	25.71c

^z Duncan's multiple range test, p=0.05.

Table 2-27. The effect of sodium L-ascorbate sprayed after 24 hours on uptake and movement in lettuce.

Treatment ^z	DHAA (a)	AA (mg %, FW)	Total (b)	Ratio (a/b, %)
With spray	17.188a ^y	43.893a	61.080a	30.768a
Without spray	14.988a	33.893b	48.883a	27.935a

^z Spray or without spray of sodium L-ascorbate 5,000 ppm at half side of same leaf of lettuce.

^y Duncan's multiple range test, p=0.05.

다. 식물공장 엽채류 질산염(NO₃)함량 저하 기술

1) 상추 및 미나리 질산염(NO₃)함량 저하 기술

질소원에 따른 상추의 미나리의 생체중, NO₃ 함량, NR 및 GR의 활성은 Table 2-28과 같다. 상추의 경우 대조구에서는 생체중이 무거웠으나, (NH₄)₂SO₄에서는 현저하게 저하되어 실제 재배에는 이용할 수 없을 정도였다. 그러나 (NH₄)₂CO₃에서는 생체중이 대조구에 비하여 20%정도 밖에 감소되지 않아서, 좀 더 합리적인 재배 방법을 찾아낸다면 경제적인 재배에 이용할 수 있을 것으로 생각되었다.

Table 2-28. Effect of different nitrogen sources on nitrate content, nitrate reductase and glutamine synthetase activity of leaf lettuce and water propwort grown with hydroponics.

Crop	Nitrogen sources	Fresh weight (g/plant)	NO ₃ ⁻ content (mg · kg ⁻¹ FW)	Enzyme activity	
				NR (μMNO ₂ · g ⁻¹ FW · h ⁻¹)	GS (μMglu. · g ⁻¹ FW · h ⁻¹)
Leaf lettuce	NH ₄ NO ₃	32.6c ^y	2,938b	5.3b	6.2b
	(NH ₄) ₂ SO ₄	3.2d	521c	3.7c	4.4c
	(NH ₄) ₂ CO ₃	45.6b	511c	5.8b	7.0b
	Control ^z	56.3a	3,726a	9.7a	10.5a
Water dropwort	NH ₄ NO ₃	38.6bc	3,845b	5.3b	5.5b
	(NH ₄) ₂ SO ₄	10.8d	511c	2.9c	3.3c
	(NH ₄) ₂ CO ₃	36.9bc	512c	4.9b	5.1b
	Control ^z	51.0a	5,218a	7.1a	9.5

^zNO₃-N : NH₄+N = 6 : 0.5meq · L⁻¹

^yMean separation within columns by doncan's multiple range test at p≤0.05.

Planting date : Oct. 1, 1995.

미나리의 생육도 상추와 유사한 양상을 나타내어 대조구에서 타 처리구에 비하여 좋았던 반면, (NH₄)₂SO₄에서는 뚜렷하게 저하되었다.

질소원을 NO₃ 및 NH₄NO₃로 하여 NH₄⁺로 하여 양액의 pH를 5로 유지하면서 상추와 미나리를 재배하면, 두 작물 공히 NO₃에 비하여 NH₄NO₃에서 16 및 29%씩 각각 지상부 생체중이 증가하고, NH₄⁺에서는 5 및 12%가 각각 증가한다(Ikeda와 Osawa, 1980)고 한다. 본 실험에서는 양액의 pH를 3일에 1회씩 조절하면서 작물을 재배하였으므로 NH₄⁺에 비하여 대조구에서의 생육이 좋았고, NH₄NO₃에서는 대조구와 (NH₄)₂SO₄의 중간 정도의 생육을 나타내었다. 그러나 NH₄⁺ 질소원 중 (NH₄)₂CO₃에서의 생육은 대조구나 (NH₄)₂SO₄에 비하여 크게 뒤지지 않았는데, 그 원인은 NH₄⁺를 흡수한 식물체로부터 방출된 H⁺ 이온이 CO₃와 결합하여 양액중에서 HCO₃⁻를 형성하여 양액의 pH저하를 완화시켰던데에 기인된 것으로 생각된다.

상추의 NO₃함량은 대조구에서 3,726mg · kg⁻¹FW(이하 mg으로 표기)으로 타 처리에 비해 많으며, NH₄NO₃에서는 2,938mg으로 중간 정도의 함량을 나타낸 반면, (NH₄)₂SO₄와 (NH₄)₂CO₃에서는 500mg 수준으로 현저히 저하되었다. 미나리에

서도 상추와 같은 경향이었으나 대조구의 체내 NO_3^- 함량이 5,218mg으로 상추에 비하여 1,400mg정도 많았다. 그러나 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 와 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 에서는 상추에서와 같이 500mg정도로 그 함량이 매우 적었다.

감자, 당근, 무 및 순무 잎의 NO_3 함량은 양액의 질소원으로 NH_4NO_3 를 이용한 경우에 비하여 NO_3 에서 높다고 하며(Ikeda와 Osawa, 1981), 질소원을 달리하여 밀을 재배하면 NO_3 의 흡수 및 체내 축적량은 NH_4 를 시용한 경우에 비하여 NO_3 를 시용하였을 때 뚜렷하게 많지만 몇 가지 NH_4 종류들 간에는 차이가 없다 (Minotti 등, 1969)고 한다.

본 실험에서는 대조구에서 상추와 미나리 공히 체내 NO_3 함량이 높았고, NH_4NO_3 에서는 중간정도를, 그리고 NH_4 에서는 매우 낮은 함량을 나타내어 이전의 보고와 일치하고 있다.

상추의 NR 활성은 대조구에서 $9.7 \mu\text{M NO}_2 \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$ (이하 μM 로 표기)로 타 처리에 비하여 높았고, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에서는 $3.7 \mu\text{M}$ 로 매우 낮았다. 그러나 NH_4NO_3 와 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 에서는 $5.3 \mu\text{M}$ 과 $5.8 \mu\text{M}$ 로 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에 비하여 2배 가까이 높았다. 미나리의 NR 활성도 상추와 같은 경향으로 대조구에서 $7.1 \mu\text{M}$ 로 타 처리에 비하여 높았다. NH_4NO_3 와 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 에서는 $5.3 \mu\text{M}$ 과 $4.9 \mu\text{M}$ 로써 중간정도의 활성을 나타냈으나 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ 에서는 $2.39 \mu\text{M}$ 로 매우 낮았다.

Rajasekhar와 Mohr(1986)는 NO_3 와 NH_4 를 질소원으로 하여 재배한 겨자잎의 NR 활성은 NO_3 에서 높고, NH_4 에서는 낮다고 하였다. 이 보고는 본 실험의 결과와 잘 일치하는 것인데, 대부분 양액의 pH조절 없이 실험을 수행한 결과들이므로 양액의 pH를 작물의 생육에 적합한 범위로 조절하면서 실험을 수행한다면, 이전의 보고들이나 본 실험의 결과와는 다른 경향을 나타낼 수 있음을 배제할 수 없다.

GS의 활성도 NR의 활성과 같은 양상을 나타내어 상추와 미나리 공히 대조구에서 10.5 및 $9.5 \mu\text{M glu.} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$ (이하 μM 로 표기)로 여타의 처리에 비하여 높았다. NH_4NO_3 와 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 에서 상추의 GS 활성은 6.2 와 $7.0 \mu\text{M}$ 을, 미나리에서는 5.5 와 $5.1 \mu\text{M}$ 을 각각 나타내어 비교적 높았으며, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에서는 $5.0 \mu\text{M}$ 미만으로 매우 낮았다.

Table 2-29. Effect of nitrogen sources on free amino acid contents in leaf lettuce and water dropwort leaves grown with hydroponics

Crop	Nitrogen sources	Amino acid concentration (nM · g ⁻¹ FW)						
		Glutamine	Glycine	Histidine	Proline	Phenyl-alanine	Tyrosine	Total
Leaf Lettuce	Control	1.38 a ^y	0.39 d	0.04 c	0.15 c	trace b	trace c	1.96 c
	(NH ₄) ₂ SO ₄	0.68 b	5.38 a	1.24 a	1.21 a	0.09 a	0.06 b	8.66 a
	NH ₄ NO ₃	0.56 b	4.24 b	1.95 b	1.46 a	0.11 a	0.08 ab	7.40 b
	(NH ₄) ₂ CO ₃	0.42 b	3.89 c	0.81 bc	1.73 a	0.18 a	0.11 a	7.14 b
Water dropwort	Control	1.43 a	0.47 c	0.06 c	0.12 c	trace b	trace b	2.08 c
	(NH ₄) ₂ SO ₄	0.71 b	5.76 a	1.32 a	1.18 a	0.08 a	0.06 b	9.11 a
	NH ₄ NO ₃	0.59 bc	4.34 b	1.18 ab	1.32 a	0.07 a	0.07 b	7.57 b
	(NH ₄) ₂ CO ₃	0.47 bc	4.14 b	0.94 b	1.51 a	0.87 a	0.87 a	8.80 ab

^zNO₃-N : NH₄-N = 6 : 0.5meq · L⁻¹

^yAlcohol insoluble solids.

^xMean separation within columns by Duncan's multiple range test at p ≤ 0.05.

Planting date : Oct. 1, 1995.

Fricke(1993)에 의하면 밀의 조직을 배양할 경우 GS의 활성은 전체 질소중 10% 미만의 NH₄를 첨가한 경우에 높아진다고 한다.

본 실험에서는 대조구에서 여타의 처리에 비하여 GS의 활성이 높았고, (NH₄)₂CO₃에서는 중간 정도를 나타내었으며, 여타의 NH₄ 질소원에서는 매우 낮았다. 이러한 결과로 미루어 보아 GS의 활성은 질소원에 따른 영향보다는 어떠한 형태이든 질소의 절대 흡수량에 더 큰 영향을 받는다는 사실을 알수 있는데, 충분한 양의 질소를 흡수하여 가용성 단백질의 함량이 증가하면 질소동화계 관련 효소의 활성이 높아진다는 Travis 등(1970)의 보고가 이를 잘 설명하고 있다.

질소원에 따른 상추와 미나리의 아미노산 함량을 Table 2-29에 나타내었다.

Glutamin의 함량은 상추와 미나리 공히 대조구에서 1.38 및 1.43nM · g⁻¹FW(이하 nM로 표기)로써 타 처리에 비하여 많았으나 여타의 처리간에는 큰 차이가 없었다. Glicine은 (NH₄)₂SO₄에서 상추와 미나리 모두 5nM 이상으로 타 처리에 비해 많았으며, NH₄NO₃와 (NH₄)₂CO₃에서는 4nM 내외로 중간정도를, 대조구에서는

0.4nM안팎으로 타 처리에 비하여 적은 함량을 각각 나타내었다.

Histidine의 경우도 절대량만 다를 뿐 glycine과 같은 경향이였다. Proline, penylanine 및 tyrosine의 함량은 여타의 처리에 비하여 대조구에서 적었는데, 특히 대조구에서의 tyrosine과 phenylanine 함량은 거의 0에 가까운 정도였다.

식물체내에서 아미노산이 지나치게 축적되면 NR 및 GS의 활성이 저하되는 Feed-back inhibition이 일어난다(Hartman, 1982)고 하는데 본 실험에서 분석한 아미노산의 총량이 많았던 질소원에서의 NR 및 GS의 활성이 낮았던 원인도 Feed-back inhibition에 기인된 것으로 사료된다.

한편 6종의 아미노산중 NR 및 GS의 활성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 Glycine일 가능성도 있다. Glycine의 경우는 질소원에 따라 10배 이상의 함량 차이를 나타내고 있는 것이 이러한 추정을 뒷받침 할 수 있으나 그에 대한 세밀한 검토가 이루어진 바 없으므로 속단하기는 어렵다.

양액의 질소원으로서 NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 및 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 의 암모늄태 질소원과 표준액을 이용하여 상추와 미나리를 30일간 재배한 후 가용성 단백질의 함량을 측정하였다.

전반적으로 미나리에 비하여 상추에서, 그리고 대조구, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, NH_4NO_3 및 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 순으로 각각 가용성 단백질의 함량이 높았는데, 이것은 Table 2-28에 나타난 질소원별 NR 및 GS의 활성과 일치하는 경향이였다. 상추의 가용성 단백질 함량은 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 에서 생체중 1g당 4.1mg으로 5.6mg을 나타낸 대조구와는 큰 차이가 없었으나 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에서는 2.2mg으로 타 처리에 비하여 뚜렷하게 낮았다.

오이 잎의 NR활성은 가용성 단백질의 함량과 밀접한 관련이 있어서 NO_3 의 시용에 의하여 가용성 단백질의 함량이 증가하고, 가용성 단백질의 증가와 더불어 NR의 활성도 높아진다고 한다. 이러한 사실은 NO_3 와 함께 단백질 합성 억제제인 cyclohexamide와 chloramphenicol을 시용한 결과, 단백질 합성 억제제를 시용하지 않은 경우에는 가용성 단백질의 함량은 증감의 변화 없이 안정되지만, 시용한 경우에는 NR의 활성이 급격히 저하된다고 한 보고 (Moon 등, 1991)에 의하여 확인되었다.

본 실험에서는 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 를 사용한 경우에도 가용성 단백질의 함량이 상당히 높았는데, 이러한 결과는 NH_4 를 사용하더라도 작물의 생육에 적합한 범위의 pH가 유지되면 질소 흡수량이 많아져서 가용성 단백질 및 GS의 활성이 높아진다고 한 Yamaya 등(1995)의 결과와 일치하는 것이다.

질소원에 따른 상추와 미나리의 alcohol insoluble solid의 함량과 pectin, hemicellulose 및 cellulose의 비율을 Table 2-30에 나타내었다.

잎채소류의 품질을 결정하는 요인에는 여러 가지가 있다. 식물체내 NO_3 함량을 저하시켰다고 해서 품질이 좋은 것만은 아니다. 가장 중요한 것은 식미이고 거기에 부가적으로 인체에 유용한 성분의 함량이 증가된다면 더 좋을 것이다. 따라서 본 실험에서는 식미 판정의 한가지 요인인 섬유질의 함유비율을 조사하였다.

AIS(Alcohol insoluble solid)는 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 및 대조구 순으로 높았다. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에서는 타 처리에 비하여 AIS의 양이 뚜렷하게 많아서 상추는 4.2%를, 미나리는 8.2%를 각각 나타내었다. 세포벽 물질중 pectin의 비율은 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 와 대조구에서 30% 내외로 여타의 처리에 비하여 많았다.

Table 2-30. Composition of cell wall compounds in hydroponically grown leaf lettuce and water dropwort leaves as affected by different nitrogen sources.

Crops	Nitrogen sources	AIS ^y (%/FW)	% of cell wall		
			Pectin	Hemicellulose	Cellulose
Leaf Lettuce	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	4.2 a	27.3 ab	30.5 a	42.2 a
	NH_4NO_3	3.4 b	29.4 ab	30.2 a	40.4 b
	$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	2.5 c	32.8 a	28.7 b	38.5 bc
	Control ^z	2.3 c	34.2 a	25.9 c	39.9 b
Water dropwort	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	8.2 a	22.3 c	27.4 c	50.3 a
	NH_4NO_3	6.4 b	25.6 b	29.7 b	44.7 b
	$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	5.3 c	29.3 a	30.1 b	40.6 c
	Control	5.0 c	30.8 a	32.8 a	36.4 d

^z $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N} = 6 : 0.5\text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$

^yAlcohol insoluble solids.

^xMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

Planting date : Oct. 1, 1995.

Hemicellulose의 비율은 상추의 경우 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 와 NH_4NO_3 에서, 미나리는 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 와 대조구에서 30% 안팎으로 타 처리에 비하여 높았다. Cellulose는 hemicellulose나 pectin에 비하여 많은 비율을 차지하였는데, 특히 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에서 상추는 42.2%, 미나리는 50.3%로 타 처리에 비하여 많았다.

두 작물 모두 세포벽 물질중 cellulose의 비율이 높아서 씹을 때 질기다는 느낌을 받을 수 있겠으나. 상추의 경우는 AIS의 비율이 4.2%에 불과하므로 8.2%인 미나리에 비하면 훨씬 부드러울 것으로 사료된다. Cellulose의 비율이 상추와 미나리 공히 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에서 높았던 원인은 양액의 pH 저하에 따른 뿌리의 손상으로 양수분의 흡수가 억제되었기 때문인 것으로 추정된다.

Table 2-31은 질소 공급원의 종류에 따른 생체중, 건물중 및 NO_3^- 의 함량을 나타낸 것이다. 대조구에서 생체중과 건물중이 타 처리에 비하여 무거웠으나 NO_3^- 함량이 타 처리에 비하여 6~10배 정도 높았다. 탄산암모늄과 암모니아수를 혼합 공급한 경우 생체중이 58.3g으로써 64.5g인 대조구에 비하여 6g 정도 가벼웠으나 NO_3^- 의 함량은 500mg대로 낮아서 상당한 효과가 있었다. 탄산암모늄을 공급하여 재배한 경우에도 대조구에 비하여 생육은 약간 뒤떨어졌으나 NO_3^- 의 함량은 현저하게 저하시킬 수 있었다.

일반적으로 암모늄만을 질소의 공급원으로 이용할 경우 암모늄의 독작용에 의하여 작물의 생육이 저해된다고 한다. 그러나 池田과 大澤(1980)에 의하면 암모늄에 의한 작물이 독작용은 양액의 pH 저하에 기인된 것이지 체내의 대사활성자체 또는 암모늄의 축적과는 큰 관계가 없다고 한다.

Table 2-31. Effect of nitrogen form in nutrient solution on fresh weight, dry weight and content of hydroponically grown leaf lettuce and *Oenantha stolonifera* DC.

Crops	Nitrogen form	Fresh weight (g/plant)	Dry weight (g/plant)	NO ₃ ⁻ content (mg · kg ⁻¹ FW)
Leaf lettuce	(NH ₄) ₂ CO ₃ + NH ₄ OH	58.3 b	2.34 b	543 b
	(NH ₄) ₂ CO ₃	56.2 b	2.26 b	517 b
	NH ₄ OH	51.3 c	2.08 b	542 b
	Control	64.5 a	3.21 a	3,948 a
<i>O. stolonifera</i> DC.	(NH ₄) ₂ CO ₃ + NH ₄ OH	32.8 b	1.71	536 b
	(NH ₄) ₂ CO ₃	31.4 b	1.63	521 b
	NH ₄ OH	28.6 b	1.51	554 b
	Control	36.1 a	1.80	5,021 a

본 실험의 결과 또한 암모늄 단독 처리에 의한 별도의 독작용은 관찰할 수 없었으며, pH를 적당하게 조절할 경우 거의 정상적인 생육을 유지하면서 체내 NO₃⁻의 함량은 현저하게 저하시킬 수 있었으므로 연속적으로 수확이 이루어지는 작물에의 적용 가능성이 확인되었다. 암모니아수를 이용할 경우 작물의 생육은 탄산암모늄을 이용한 경우에 비하여 왕성하였으나 인체에 접촉될 경우 화상의 위험은 물론 가스장해의 염려가 있으므로 사용을 삼가는 것이 바람직한 것으로 생각된다

2) 배양액의 NO₃⁻:NH₄⁺의 비율이 바실의 생육 및 질산염(NO₃)함량에 미치는 영향

배양액을 교체하지 않은 상태에서 근권내 NO₃⁻와 NH₄⁺의 일변화는 Fig. 2-24와 같다. 근권내 NO₃⁻의 함량은 모든 처리에서 감소하는 경향을 보였는데 처리 9일 후에는 NO₃⁻단독 처리구를 제외한 모든 처리에서 50 ppm이하로 떨어졌다. 특히 NO₃⁻의 비율이 가장 적었던 30:70 처리구에서는 20 ppm이하로 근권내 미량으로

존재하였으며 식물체에 의한 NO_3^- 의 흡수량은 85:15에서 가장 높았다. 마찬가지로 근권내 NH_4^+ 의 함량도 전처리구에서 감소되었다. 특히 NH_4^+ 의 비율이 가장 높았던 30:70 처리구에서 가장 많은 양이 감소됨에 따라 근권내 pH의 저하가 크게 나타난 것으로 보인다.

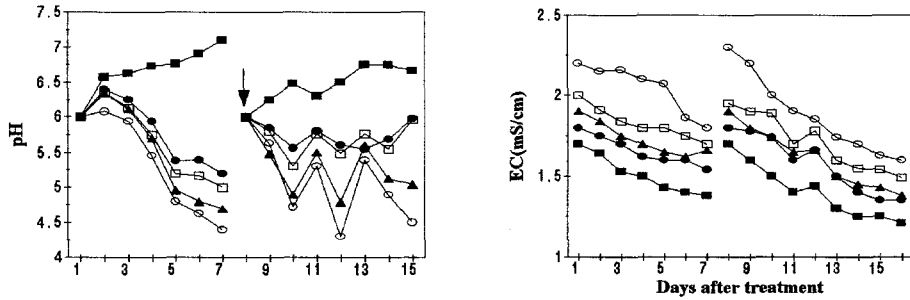


Fig. 2-24. Changes of pH and EC in the nutrient solution at different ratio of $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$. ↓: pH was readjusted to 6.0 with H_2SO_4 and KOH. [100 : 0(■), 85 : 15(●), 70 : 30(□), 50 : 50(▲) and 30 : 70(○)]

질소형태 비율에 따른 스위트 바실의 생육은 100:0, 85:15 및 70:30 처리에서 엽중, 생체중 및 건물중 등의 전체적인 생육이 높게 나타났으나 처리비율간 통계상의 유의적인 차는 나타나지 않았다. 그러나 NH_4^+ 의 비율이 높은 50:50과 30:70 처리구에서의 지상부의 생육은 현저히 떨어져 뚜렷한 차이를 나타내었을 뿐만 아니라 뿌리의 생육도 상당히 저해되어 외관상으로도 현저한 차이를 보였다(Table 2-32).

일반적으로 배양액내 NO_3^- 는 고농도로 사용해도 작물뿌리에 해가 나타나지 않으나 NH_4^+ 는 낮은 농도라도 단독으로 사용하면 생육에 장애가 나타나기 쉽다고 한다(Goyal, 1982; Mengel과 Kirkby, 1987). 일찍이 Hewitt(1965)는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 적정농도 범의를 $0 \sim 3\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 규정하였으며, 岩田(1985)은 시금치를 제외한 여러 채소작물에서 $\text{NO}_3 : \text{NH}_4$ 비를 9:1~7:3 으로 하면 생육에 지장이 없지만 5:5가 그 한계라고 하였다. 또한 金(1989) 등은 대부분의 채소작물은 NH_4^+ 의 비율이 20%를 넘지 않아야 정상적인 생육을 지속할 수 있다고 보고하고 있어 본 연구결과를 입

증시켜 주고 있다.

질소형태 비율에 따른 엽내 무기성분 분석결과, NO_3^- 단독 처리구에서 질소를 제외한 모든 무기성분 함량이 높게 나타났다. 일반적으로 NH_4^+ 의 비율이 높으면 K, Mg 및 Ca 등의 양이온의 흡수는 억제되고 P의 흡수는 조장된다고 보고되어 있는데 (池田, 1981; Ruth, 1983), 본 실험에서도 P를 제외한 성분에서 유사한 결과를 나타내었다. 스위트 바실의 광합성을 측정한 결과, 85:15 처리구에서 가장 효율이 높았으나 그 외 처리구간의 유의적인 차는 나타나지 않았다(Table 2-34).

엽내 질산염 함량은 배양액내 NO_3^- 농도가 높을수록 높아지는 경향을 나타내었던 반면, NH_4^+ 농도가 50%와 70%로 처리된 구에서는 현저히 감소되어 500 ppm 이하로 나타났다.

Table 2-32. Effects of different ratios of $\text{NO}_3\text{-N} : \text{NH}_4\text{-N}$ in nutrient solution on the growth of sweet basil at 27 days after transplant.

Ratio of $\text{NO}_3\text{-N} :$ $\text{NH}_4\text{-N}$	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Stem diameter (cm)	Leaf weight (g/plant)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		Dry matter (a/b)(%)
						Shoot (a)	Root	Shoot (b)	Root	
100 : 0	50.1 a ^z	13.9 a	7.30 a	0.78 a	65.2 a	92.4 a	24.1 a	7.66 a	1.60 a	8.23 a
85 : 15	50.7 a	14.6 a	7.20 a	0.73 a	65.8 a	96.9 a	23.3 a	7.56 a	1.64 a	7.78 b
70 : 30	47.1 a	14.0 a	7.90 a	0.72 a	60.2 a	83.8 a	21.3 a	7.04 a	1.02 b	8.07 a
50 : 50	48.4 a	15.2 a	8.08 a	0.65 b	36.9 b	58.0 b	15.9 b	4.49 b	1.01 b	7.76 b
30 : 70	45.9 b	15.0 a	8.02 a	0.60 b	38.6 b	59.0 b	15.3 b	4.48 b	1.00 b	7.61 b

^zThe values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test at 5% level.

수경재배시 생육 기간중에 배양액의 NO_3^- 농도를 낮게 유지시키면 체내의 질산염 함량도 낮아지지만 생육은 상당히 억제되는 경우가 보고되어 있다(岩田, 1971; 張, 1990). 본 실험에서도 마찬가지로 NO_3^- 농도가 낮은 처리구에서 체내 질산염 함량은 감소되었으나 생육량은 NO_3^- 단독처리구, 15% 및 30% 혼용구에 비해서

낮게 나타났다.

이상의 결과, 스위트 바실의 양수분 흡수율에 따라 조성된 시립대 배양액(SCU)으로 NFT방식에 의해 재배하였을 때 근권내 EC, pH 및 무기성분 농도의 변화가 비교적 적어 배양액 관리가 용이하고, 생육과 수량도 높은 최적 $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$ 비율은 85:15가 가장 적합한 것으로 나타났다.

따라서, 바실의 양액재배에 적합한 배양액 조성은 $\text{NO}_3\text{-N}$ 10.9, $\text{NH}_4\text{-N}$ 1.9, P 3.6, K 5.8, Ca 5.8, Mg 3.0 $\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$ 으로 나타났다.

Table 2-33. Effects of $\text{NO}_3\text{-N}$ to $\text{NH}_4\text{-N}$ ratios on CO_2 assimilation rates, nitrate and mineral contents of sweet basil.

Ratio of $\text{NO}_3\text{-N}$: $\text{NH}_4\text{-N}$	Photo- synthesis ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ^y	Nitrate (ppm)	T-N P K Ca Mg				
			(% / dry wt.)				
100 : 0	11.8 b ^c	2884 a	3.56	0.86	5.69	1.97	0.416
85 : 15	13.9 a	2388 a	3.46	0.81	4.93	1.57	0.317
70 : 30	11.0 b	2295 a	3.93	0.81	5.68	1.47	0.299
50 : 50	12.2 b	403 b	3.00	0.73	4.75	1.52	0.283
30 : 70	11.2 b	325 b	3.51	0.83	4.62	1.61	0.321

^z Means separation within columns by Duncan's multiple range test at 5%level.

^y Measured condition :

light intensity; 850~1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, CO_2 concentration; 350~390 ppm,
leaf temp.; 39°C

라. 식물공장에서 엽채류 품질(Tipburn) 제어

1) 식물공장내 기온과 상대습도 조건이 상추의 광합성, 생육 및 잎끝마름 발생에 미치는 영향

가) 기온

광합성과 식물 대사과정에 주요한 인자로 작물 생산에 밀접한 영향을 주는 온도가 식물공장형 재배 방식에서 반결구 상추와 잎상추의 생육과 품질에 미치는 영향을 알아보기 위하여 생육 단계에 따른 광합성, 기공저항, 수분이용효율 및 증산률을 측정하였다(Fig. 2-25). 반결구 상추의 광합성은 생육이 진전됨에 따라 처리 35일째까지 10/7℃와 20/15℃에서는 증가하였으나 30/25℃에서는 차이가 없었다. 처리 15일과 25일째 반결구 상추 광합성은 30/25℃에서 가장 높았으며, 처리 35일째에는 20/15℃에서 가장 높았다. 기공저항은 처리 25일째를 제외하고는 10/7℃에서 높게 나타났다. 수분이용효율은 1mol당 H₂O에 대한 mmol CO₂값으로 표시했을 때 처리 15일째는 10/7℃ 처리가, 25일째에는 30/25℃, 35일째에는 20/15℃ 처리에서 가장 높았다. 증산률은 생육단계별 온도처리에 따라 차이를 보였다. 처리 15일째는 30/25℃에서, 25일째와 35일째는 20/15℃에서 가장 높았다.

잎상추의 광합성은 처리 15일과 25일째에는 온도 상승에 따라 증가하는 경향을 보이다가 생육 후기(처리 35일째)에는 20/15℃와 30/25℃에서 뚜렷한 증가를 하여 10/7℃에 비해 1.8~2.3배 높았다. 기공저항은 광합성 속도에 반비례하는 경향을 보여, 처리 15일째에는 10/7℃에서, 25일째에는 20/15℃에서, 35일째에는 10/7℃와 30/25℃에서 높았다. 수분이용효율은 처리 15일째는 10/7℃에서, 25일째는 20/15℃에서, 35일째는 20/15℃와 30/25℃에서 높았다. 증산률은 생육초기에는 온도 상승에 따라 증가하여 30/25℃에서 가장 높았으나 생육 중·후기에는 감소하였다.

반결구 상추와 잎상추 모두 생육단계별 광합성은 10/7℃에서 가장 낮았다. 이는 저온에 의한 양·수분 흡수가 저해됨에 따라 광합성과 지상부 생육 저하가 발생

된 것이라 생각된다. 그러나 증산률은 생육 초기에는 10/7℃에서 낮은 증산률을 나타내 광합성 결과와 같았으며, 10/7℃에서 높은 수분이용효율을 나타냈다.

엽내 수분이용효율이 높은 것은 저온에 의한 생육저해가 단위 엽면적당 엽육의 두께가 두꺼워짐으로서 표피 왁스 층의 증가와 큐티클 증산의 감소에 따른 일종의 체내 방어기능으로 작용했던 것으로 보인다(Hirohumi와 Ogata, 1987). 그러나 생육 증기는 30/25℃에서 높은 광합성에 비해 증산률이 가장 낮아 수분이용효율이 높았다. 이는 두 품종 모두 30/25℃에서 생육기간 동안 생육이 가장 높고 상대생장률이 빨랐으며, 특히 반결구 상추는 결구가 형성됨에 따라 잎끝마름이 발생되었던 처리로 낮은 증산이 칼슘 이동에 영향을 준 것으로 보인다(Clarkson, 1984). 상추 잎끝마름 발생률은 고온에서 높았는데, 이와같은 결과는 Cox 등(1976), Tibbitts과 Rao(1968), Yanagi 등(1983) 등의 결과와 일치하였다. Misaghi와 Grogan(1978a)은 5℃에서 30℃로 온도가 상승함에 따라 결구 상추의 호흡률이 증가하고 유기산과 대사산물이 칼슘과 칼레이트화 됨으로써 국부적인 칼슘 결핍이 생겼으며, 잎끝마름이 발생하는 동안 높은 호흡률은 단백질 합성을 제한하며, 단백질 가수분해가 진행되어 유해한 유기 아미노산이 축적될 수 있다고 하였다(Ashkar와 Ries, 1971).

온도 차이가 상추의 광합성, 증산률 및 형태적 특성에 변화를 보이면서 생육 중, 후기에는 잎끝마름이 발생하였다. Marshner(1995)는 칼슘이 부족하면 세포막의 투과성이 증대한다고 보고하였다. 따라서 환경 조절상에서 온도 처리 3주 후에 막 투과성의 변화를 알아보기 위해 이온 유출량을 측정하였다(Table 2-34). 잎의 이온 유출량은 두 품종 모두 30/25℃ 처리가 10/7℃와 20/15℃에 비해 2배 이상 높았다. 30/25℃ 처리에서 두 품종 상추는 생육이 가장 빨랐으며, 반결구 상추는 잎끝마름이 발생한 처리로 높은 이온 유출량은 막 투과성의 변화가 일어났음을 확인할 수 있었다.

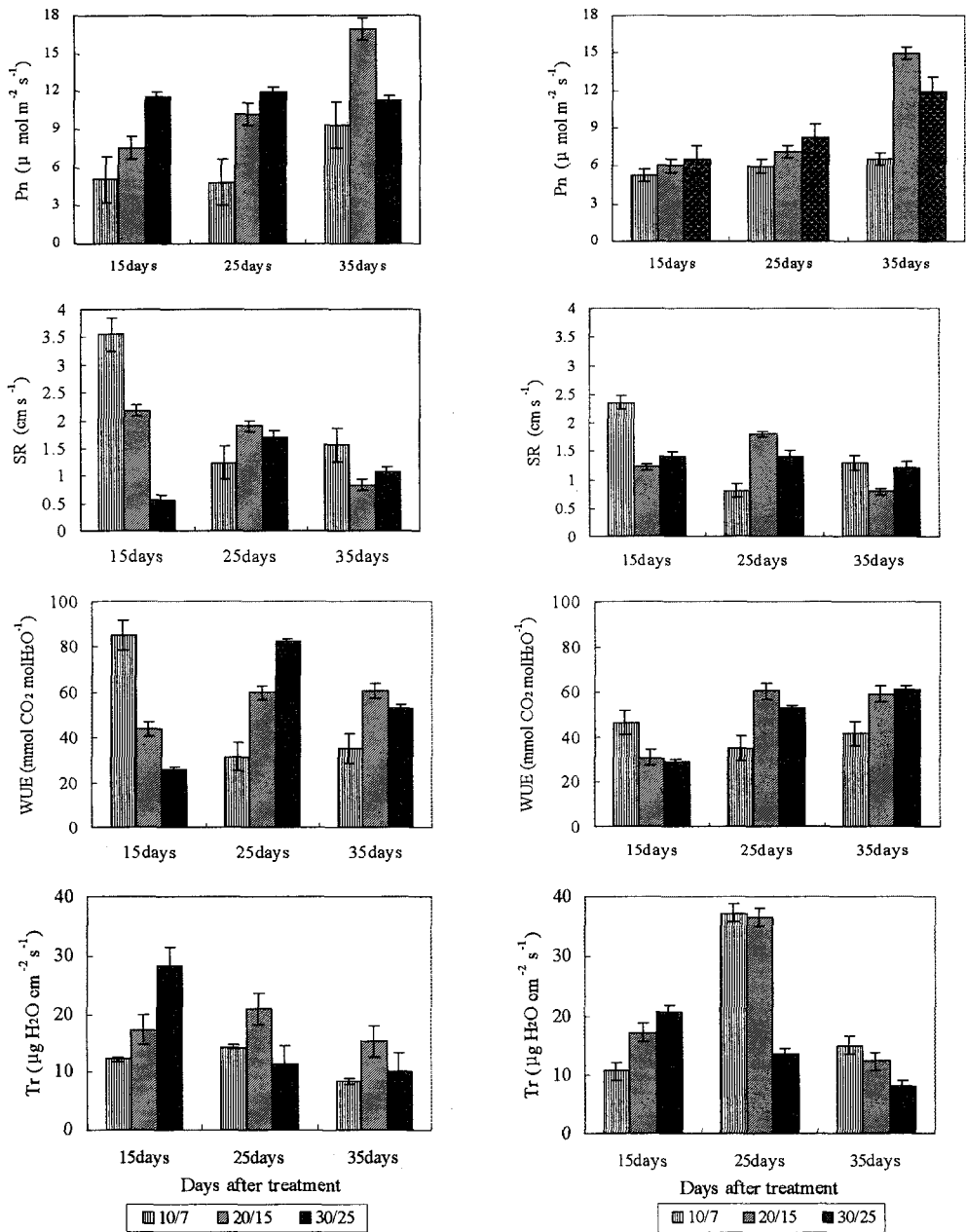


Fig. 2-25. Effect of air temperature on photosynthesis (Pn), stomatal resistance (SR), water use efficiency (WUE) and transpiration rate (Tr) of butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 15, 25 and 35 days after treatment in the plant factory.

Vertical bars represent SE.

그러나 잎상추는 잎끝마름이 발생하지 않아 종간 차이를 보였다. 고온처리에서 높은 이온 유출은 빠른 성장속도가 상추 잎의 세포 분열, 조직 확대가 진행되는 과정에서 발생하는 막투과성의 변화로 생각된다. 또한 칼슘은 세포벽 구성성분으로 조직으로의 칼슘 이동이 늦어지면서 세포벽의 결합력이 약화되고 이것이 이온 유출을 증가시킨 것으로 보인다.

Table 2-34. Effect of air temperature on ion leakage of butterhead and leaf lettuce at 3 weeks after treatment in the plant factory. (unit: dS m⁻¹)

Air temp.(°C) (day/night)	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
10/7	0.096 b ²	0.056 b
20/15	0.085 b	0.060 b
30/25	0.219 a	0.132 a

²Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

상추의 생육단계별 지상부 생체중과 잎끝마름 발생 및 상대생장률을 측정된 결과(Table 2-35) 전 생육기간 동안 반결구 상추와 잎상추의 생체중은 두 품종 모두 10/7°C에서 가장 낮았으며, 30/25°C 처리에서 가장 높았다. 생육 초, 중기 생육기간 동안 저온 하에서 두 종의 상추는 엽장과 엽폭이 짧고, 엽육이 두꺼워짐이 관찰되었으며, 엽수가 작아 생육이 억제된 반면, 고온에서는 왕성한 생육을 보여 온도 상승에 따른 생체중은 증가하였다. 그러나 생육 후기 단계에서 반결구 상추는 20/15°C와 30/25°C 처리간 생체중 차이가 없었으나, 잎상추는 온도 상승에 따라 생체중이 증가하여 온도에 따른 성장 패턴이 종간 다른 특성을 보였다. 한편 생육 중기는 두 품종 모두 30/25°C 처리에서 생체중이 높았고 상대 생장률이 빨랐지만 반결구 상추에서만 잎끝마름이 발생되었다. 이는 성장속도가 빨라지면서 반결구 상추의 결구가 형성됨에 따라 내부잎의 잎 조직에 양·수분의 공급이 원활하게 이루어지지 못함에 따른 것으로 보인다(Barta와 Tibbitts, 1991; Clarkson, 1984; Collier와 Huntington, 1983). 생육 후기 상대생장률은 저온 처리에서 반결구 상추

와 잎상추 모두 성장속도가 가장 빨랐지만 이것은 다른 온도 처리구의 생육 중기 단계의 성장량으로 잎끝마름 발생에는 영향이 없었다. 그러나 생육 중기에 비해 3.2~4.2배의 성장을 보인 20/15°C 처리에서 반결구 상추는 100%, 잎상추는 50% 잎끝마름이 발생하였다. 이는 생육 후기 성장속도에 영향을 받아 잎끝마름 발생이 증가한 것으로 보이며(Thompson 등, 1998), 같은 온도 조건이나 성장 속도가 빠르더라도 본 실험에서 잎끝마름 내성은 잎상추가 강했다. 이는 품종이 가진 형태적 특성에 영향을 받은 것으로 보인다. 한편 30/25°C 처리에서 처리 35일째 반결구 상추와 잎상추의 성장량은 생육중기에 비해 2.1~2.9배를 나타냈으나 잎끝마름은 발생되지 않았다. 이것은 생육후기 고온 조건이 두 품종에서 광합성 속도와 증산이 낮아짐에 따라 체내 대사 활성이 떨어진 것으로 생각된다.

Table 2-35. Effect of air temperature on fresh weight, incidence of tipburn and relative growth rate (RGR) of butterhead and leaf lettuce at 15, 25 and 35 days after treatment in the plant factory.

Air temp.(°C) (day/night)	Fresh wt. (g plant ⁻¹)			Tipburn (%)			RGR (g g ⁻¹ day ⁻¹)	
	15day	25day	35day	15day	25day	35day	I ^z	II ^y
Butterhead lettuce 'Omega'								
10/7	3.16 c ^x	12.5 c	57.8 b	0	0	0	0.092	0.134
20/15	8.38 b	36.8 b	116.5 a	0	0	100	0.103	0.117
30/25	14.7 a	57.3 a	120.6 a	0	67	0	0.120	0.076
Leaf lettuce 'Grand Rapids'								
10/7	1.78 c	5.1 c	25.7 c	0	0	0	0.069	0.175
20/15	3.43 b	15.9 b	66.7 b	0	0	50	0.114	0.142
30/25	6.08 a	37.1 a	105.6 a	0	0	0	0.147	0.119

^zMiddle stage; measured from August 31 to October 8, 1998.

^yLast stage; measured from October 8 to October 23, 1998.

^xMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

Wurr 등(1992)은 노지재배에서 상추의 적정온도를 주간 17~28℃, 야간 3~12℃의 넓은 범위로 설정하였으며, Marsh(1987)는 온실내 반결구 상추 'Ostinata'의 주간 적정온도를 24℃로 보고하였다. 또 Thompson 등(1998)은 지상부/지하부 온도가 24/24℃일 때 건물중은 최대였으나 31/24℃의 마지막 수확시 건물중은 24/24℃와 차이가 없다고 하여 본 실험의 반결구 상추와 같은 결과를 보였다. 이는 지하부 온도가 적정하다면 지상부 온도가 적정 온도를 벗어난 고온일지라도 상추의 생산성을 유지하는 것으로 지상부 온도도 중요하지만 지하부의 적합한 온도 조건에서는 양·수분 흡수에 대한 뿌리 저항을 감소시킴으로서 작물의 수분 균형을 향상시킨 결과로 생각된다(Challa 등, 1995).

이와 같이 성장 속도가 높게 유지되는 생육 적은 및 그 이상의 온도에서는 잎끝마름이 발생되었는데, 이것은 고온 조건이 작물 성장을 촉진시킴과 더불어 잎끝마름 발생에 중요한 역할을 하는 인자임을 알 수 있었다. Yanagi 등(1983)과 Wien(1998)도 평균 최저 온도 이상에서 잎끝마름은 증가한다고 보고하였다. 이상의 결과에서 상추의 생산성과 품질 향상을 이루기 위한 환경 조절형 재배 방식에서의 적합한 주간 기온 조건은 육묘기는 24~28℃의 고온에서, 생육 초, 중기는 22~26℃, 생육 후기는 20~24℃, 야간 기온은 육묘기 20~25℃, 생육기는 15~20℃의 온도에서 재배하는 것이 좋으리라 판단된다.

나) 상대 습도

식물 공장과 같은 환경제어형 재배방식에서 습도 환경은 작물의 생산성과 품질에 미치는 영향이 크다. 이처럼 환경제어를 통한 상추 계획 생산과 품질 향상을 위한 습도 환경의 영향을 알아보기 위하여 주/야 습도 환경을 달리하여 광합성과 증산률을 측정하였다. 조절된 환경 생육상에서 주/야 습도 조건을 40%와 80%로 각각 달리하여 25일동안 재배한 반결구 상추의 광합성은 야간 습도와 관계없이 주간의 40% 처리는 80% 처리에 비해 광합성이 저하하였고 기공 저항은 증가했다(Table 2-37). 그러나 증산률은 주/야 80/40%에서 높았으며, 나머지 처리는 습도에 의한 차이가 없었다. 지상부 환경이 저습일 때는 대기로부터의 수분 손실을 막기 위해 기공을 닫으므로써 CO₂ 교환에 영향을 줄 수 있으며, 이것이 본 실험에서는 주간

의 40% 처리에서 광합성 저하로 나타났다고 보여진다. 한편 다습은 기공 컨덕턴스가 증가함에 따라 광합성 속도는 증가하였지만 다습으로 인해 증산률이 저하될 때는 뿌리로부터의 수분흡수가 저해되므로 증산류에 의해 이동되는 칼슘 흡수와 전류는 감소할 수 있음을 짐작되었다.

잎상추의 광합성은 80/40% 처리에서 가장 높고, 40/80%와 80/80%는 차이가 없었다(Table 2-37). 잎상추의 광합성은 습도 처리에 따른 광합성이 $10.3 \sim 16.8 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 범위로 큰 차이를 보이지 않은 반면 반결구 상추는 주간 습도 차이로 인한 광합성이 다습에서 2배이상 높았다. 그러나 증산률은 두 품종 모두 주간 40% 처리에서 낮았으며, 결구가 형성되는 반결구 상추는 80/80%에서 높은 광합성에도 불구하고 가장 낮은 증산률을 보인 반면, 잎상추는 주간 40% 처리에 비해 2배의 증산률을 나타내 종간에 따른 형태적 특성이 증산률의 차이를 가져온 것으로 생각된다. 이상의 결과는 가습 처리했을 때 높은 상대습도는 잎 증산이 억제됨에 따라 물관의 증산류로 이동하는 칼슘의 과실로의 이동이 억제됨으로써 토마토의 배꼽썩음과가 발생하였다고 보고한 Cho 등(1998)의 결과와도 같았다.

Table 2-36. Effect of relative humidity (RH) on photosynthesis, stomatal resistance and transpiration rate of butterhead lettuce 'Omega' at 25 days after treatment in the plant factory.

RH (%)	Photosynthesis ^z ($\mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Stomatal resistance (s cm^{-1})	Transpiration rate ($\mu \text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
40/40	12.27 b ^y	0.903 a	4.99 b
40/80	14.44 b	0.941 a	5.16 b
80/40	23.54 a	0.273 c	13.93 a
80/80	23.52 a	0.599 b	4.53 b

^zMeasuring conditions: 23.5~25.7°C leaf temp., 125~141.5 $\mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD, 467~520.6 mg L^{-1} CO₂ concentration.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

Table 2-37. Effect of relative humidity (RH) on photosynthesis, stomatal resistance and transpiration rate of leaf lettuce 'Grand Rapids' at 25 days after treatment in the plant factory.

RH (%)	Photosynthesis ^z ($\mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Stomatal resistance (s cm^{-1})	Transpiration rate ($\mu\text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
40/40	13.34 b ^y	1.191 b	4.76 c
40/80	10.31 c	1.297 a	4.39 c
80/40	16.87 a	0.335 d	16.83 a
80/80	13.72 b	0.595 c	8.66 b

^zMeasuring conditions : 25.5~27.3°C leaf temp., 130~140.3 $\mu\text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PPFD, 500~565 mg L^{-1} CO₂ concentration.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

그러나 Choi(1997)는 야간다습으로 인해 토마토와 오이 식물체의 상부로의 칼슘 운송이 크게 감소했으나 딸기는 오히려 증가함에 따라 식물 종에 따라 습도와 칼슘 이동은 상이하다고 보고한 것처럼 본 실험에서 주간 습도가 건조할 때 야간 습도 조건에 의한 칼슘 이동을 증산률을 통해서도 확실히 결론지을 수 없으나 주간이 다습할 때는 야간 다습이 증산률을 저해하는 것을 확인할 수 있어 같은 결과를 얻었다. 한편 사관을 통해 전류되는 광합성 산물과 수분에는 칼슘이 거의 함유되어 있지 않아(Clarkson, 1984) 80/80% 처리의 광합성이 가장 높았으나 증산이 낮아짐에 따라 칼슘의 이동에는 영향을 준 것으로 보인다.

습도 처리 25일 후 반결구 상추의 생육은 80/80% 처리에서 엽수가 가장 많음에 따라 생육이 가장 높았으며, 최대 엽장, 엽폭은 처리간 차이가 없었다(Table 2-38).

Table 2-38. Effect of relative humidity (RH) on growth characteristics and incidence of tipburn of butterhead lettuce 'Omega' at 25 days after treatment in the plant factory.

RH (%)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Fresh weight (g plant ⁻¹)		RGR ^z (g g ⁻¹ day ⁻¹)		Tipburn(%)	
				Shoot	Root	I ^y	II ^x	I ^w	II ^v
				40/40	18.7	15.2	36.3 b ^u	87.2 b	9.2 b
40/80	19.8	15.0	35.0 b	91.4 b	10.7 a	0.094	0.066	0	0
80/40	19.7	15.0	31.3 c	81.9 c	8.5 b	0.099	0.056	33.3	20
80/80	20.2	14.0	41.7 a	101.2 a	9.5 b	0.111	0.046	67.0	100

^zRelative growth rate. ^yStage from December 24, 1998 to January 8, 1999. ^xStage from January 8 to January 18, 1999. ^wIncidence of tipburn at 15 days after treatment. ^vIncidence of tipburn at 25 days after treatment.

^uMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

습도 조건에 따른 엽수의 차이는 상추 수량에 직접적인 영향 인자로 작용하였으며, 잎끝마름 발생은 주/야 40/80% 처리를 제외하고는 모두 발생되었다. 특히 주/야 80/80% 처리는 100% 발생하였는데, 이 처리는 광합성은 높았으나 증산률이 낮았던 처리였다. 더우기 주/야 다습한 80/80% 처리는 초기 상대 생장률이 가장 높았던 처리로 다습 조건은 빠른 성장과 낮은 증산으로 잎끝마름 발생을 유도한 것으로 보였다. 그러나 초기의 상대생장률이 80/40% 처리보다 주간이 저습한 40/40% 처리는 상대생장률은 빨랐지만 초기의 잎끝마름은 주간이 다습 조건일 때 발생하였다. 이처럼 빠른 생육을 유도하는 생육 단계에서 다습 조건은 빠른 생장률이 잎끝마름 유도를 증가시킨다는 Bakker 등(1987)과 Stratton과 Nagata(1994) 결과와 같았다.

잎상추의 생육도 반결구 상추와 같이 80/80% 처리에서 가장 높았으며, 엽장, 엽폭, 엽수는 처리간 차이가 인정되나 지상부 생육은 80/80% 처리를 제외하고는 차이가 없었다(Table 2-39). 그러나 상대생장률이 가장 빨랐던 80/80% 처리에서도 잎끝마름은 발생하지 않아 잎상추는 습도 조건에 따른 잎끝마름 발생에 영향을 받지 않았다. 이는 상추의 형태적 특성에 따른 차이가 반결구 상추의 결구 형성기

내부 잎의 낮은 증산과 함께 다습한 조건이 증산률 제한 인자로 작용함에 따라 잎끝마름 발생이 증가한 반면 잎상추는 어느 정도 증산이 이루어졌기 때문으로 생각된다.

Table 2-39. Effect of relative humidity (RH) on growth characteristics and incidence of tipburn of leaf lettuce 'Grand Rapids' at 25 days after treatment in the plant factory.

RH (%)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Fresh weight (g plant ⁻¹)		RGR ^z (g g ⁻¹ day ⁻¹)		Tipburn (%)
				Shoot	Root	I ^y	II ^x	
40/80	22.5 a	13.7 a	20.0 a	64.6 b	9.94 b	0.099	0.068	0
80/40	21.3 ab	12.0 b	21.3 a	67.6 b	7.83 c	0.103	0.069	0
80/80	21.5 ab	15.0 a	21.0 a	124.3 a	14.81 a	0.113	0.112	0

^zRelative growth rate. ^yStage from December 24, 1998 to January 8, 1999.

^xStage from January 8, to January 18, 1999.

^wMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

본 실험에서 반결구 상추와 잎 상추 모두 주/야 다습할 때 생육은 가장 높았다. 그러나 본 실험 결과는 다습이 오이와 토마토의 수량을 감소시켰다고 보고한 Bakker(1984)의 연구 결과와는 달랐으나 Choi(1997)는 야간 다습으로 오이 생육은 감소했으나, 토마토는 지상부 건물중과 엽면적이 증가한 반면 딸기는 차이가 없다고 보고함에 따라 습도에 대한 작물 생육의 영향은 다른 것으로 보인다(Adams, 1991).

다습한 습도 환경이 반결구 상추와 잎상추의 높은 생육량을 보였으나 반결구 상추에서만 잎끝마름이 발생함에 따라 품질 저하를 가져왔다. 따라서 잎끝마름의 원인을 알아보기 위해 엽위에 따른 무기이온 함량을 분석하였다(Table 2-40, Table 2-41). 반결구 상추의 엽내 무기양이온 함량은 내부잎의 엽내 가리, 칼슘, 마그네슘 함량이 외부잎보다 낮았다. 내부잎의 엽내 가리 함량은 80/80% 처리에서 가장 높았으며, 주간의 40% 처리는 야간 습도 처리의 영향을 받지 않았으나

주간의 80% 처리는 야간의 다습 처리에서 높은 가리 함량을 나타냈다. 내부잎의 칼슘 함량은 주간 40% 처리가 야간 80% 처리보다 높았으며, 야간의 다습은 주간 40% 처리보다 높았다. 외부 잎도 내부 잎과 같은 결과를 보였다. 마그네슘 함량은 칼슘 함량과 같은 결과로 내부 잎은 40/80% 처리에서 가장 높았으며, 주간 40% 처리에서, 야간은 80%의 다습 조건일 때 마그네슘 함량이 높았다. 엽내 K/Ca비는 내부잎의 비율이 외부잎보다 높았다. 또한 상추의 잎끝마름 발생 부위는 내부잎이며, K/Ca비가 높은 처리에서 발생함에 따라 잎끝마름은 칼슘 부족에 의한 영양장애이기보다는 조직내 무기이온의 불균형 분배로 일어남을 보였다. 이러한 결과는 Himelrick과 McDuffie(1983)이 칼슘과 관련한 생리 장애는 뿌리로부터의 제한된 양분 흡수보다는 조직으로의 칼슘의 분배가 부적절하게 이루어지기 때문이라고 보고한 결과와 일치함을 뜻한다. 또 Bar-Tal과 Pressman(1996)은 토마토의 배꼽썩음과 발생과 K/Ca비와는 상관관계가 인정된다고 한 것과 같이 본 실험에서 내부잎의 K/Ca비가 높은 처리는 잎끝마름이 발생함에 따라 일치하였다. 그러나 Mg/Ca비는 내부잎의 비율에서는 습도처리에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않아 무기이온 성분은 가리와 칼슘에 의한 영향이 마그네슘 이온보다 더 큰 요인으로 작용하였다.

Table 2-40. Effect of relative humidity (RH) on mineral nutrient content of butterhead lettuce 'Omega' at 25 days after treatment in the plant factory.

RH(%)	Leaf position ^z	K	Ca	Mg	K/Ca	Mg/Ca
		----- % -----			----- ratio -----	
40/40	Inner	5.709 c ^y	0.704 c	0.268 d	8.11	0.38
	Outer	7.544 a	1.253 ab	0.479 a	6.02	0.38
40/80	Inner	5.639 c	0.850 c	0.355 b	6.63	0.42
	Outer	7.975 a	1.409 a	0.487 a	5.66	0.35
80/40	Inner	4.902 c	0.685 c	0.266 d	7.16	0.39
	Outer	7.416 ab	1.183 b	0.484 a	6.27	0.41
80/80	Inner	6.896 b	0.769 c	0.303 c	8.97	0.39
	Outer	6.950 b	1.344 ab	0.504 a	5.17	0.38

^zInner and outer leaves refer to 1st to 7th and 10th to 15th leaves from growing apex of lettuce.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

Table 2-41. Effect of relative humidity (RH) on mineral nutrient content of leaf lettuce 'Grand Rapids' at 25 days after treatment in the plant factory.

RH(%)	Leaf position ^z	K	Ca	Mg	K/Ca	Mg/Ca
		----- % -----			---- ratio ----	
40/40	Inner	4.324 e ^y	0.765 d	0.229 d	5.64	0.30
	Outer	6.892 b	1.094 b	0.346 b	6.30	0.32
40/80	Inner	4.539 e	0.810 cd	0.280 c	5.60	0.35
	Outer	6.248 c	1.191 ab	0.392 a	5.25	0.33
80/40	Inner	5.855 cd	0.877 cd	0.324 b	6.68	0.37
	Outer	7.214 ab	1.125 ab	0.398 a	6.41	0.36
80/80	Inner	5.769 d	0.906 c	0.263 c	6.37	0.29
	Outer	7.595 a	1.231 a	0.381 a	6.17	0.31

^zInner and outer leaves refer to 1st to 7th and 10th to 15th leaves from growing apex of lettuce.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

잎상추의 엽위에 따른 무기 이온 결과는 외부잎의 가리, 칼슘, 마그네슘 함량이 내부 잎의 무기이온 함량보다 높아 반결구 상추와 같았다(Table 2-41). 내부잎의 가리 함량은 야간 습도와 상관없이 주간이 다습 조건일 때 높았으나 엽내 칼슘 함량은 주간/야간 모두 다습조건일 때 높았으며, 마그네슘 함량은 습도에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 반결구와 잎상추의 엽위에 따른 습도 처리가 가리와 마그네슘 함량을 통해서는 뚜렷한 결과를 얻지 못했지만 두 품종 모두 칼슘 함량은 야간의 다습 조건일 때 높았다. 즉 이는 칼슘의 체내 이동 경로가 주로 증산류와 근압류에 의해 이루어짐을 뒷받침하는 결과로 칼슘 이동이 주간 습도가 낮고 야간 다습할 때 잘 이루어진다고 보고한 Collier와 Tibbits(1982), Guttidge 등(1981), Palzikill와 Tibbits(1977)의 결과와 같았다.

또한 Wiebe 등(1977)은 근압은 낮의 증산류보다 밤의 다습으로 생기며 양배추 등의 미전개잎에서의 칼슘 이동은 근압에 의해 이루어진다고 보고한 것과 같이

상추의 미전개잎과 같은 낮은 증산조직에서는 야간 다습으로 근압에 의해 칼슘 이동이 이루어짐을 알 수 있었으며, 칼슘과 관련된 작물의 생리적 장애가 습도에 의해 영향을 받는다는 것을 반결구 상추에서 확인할 수 있었다. 그러나 잎상추는 습도 처리에 의한 잎끝마름이 발생하지 않았으며, 반결구 상추의 K/Ca비와 비교할 때 잎상추의 비율은 낮은 경향을 보였으며, 이는 Mg/Ca 비율도 같은 경향을 보여 잎상추는 잎 조직의 무기이온 분배가 어느 정도 이루어지고 있는 것으로 판단되었다.

이상의 습도에 따른 반결구 상추와 잎상추의 환경 제어형 식물 공장식 재배방식에서 다습은 작물의 생산성은 이를 수 있으나 반결구 상추에서는 품질의 저하를 가져왔다. 특히 엽내 무기이온 분석 결과 K/Ca비가 7.1 이상 되었을 때 잎끝마름이 발생되었다. 따라서 생육 초기에는 70~80%의 다습으로 빠른 생육을 유도하고 생육 중, 후기에는 50~60%의 상대습도를 유지하여 생산성과 품질 향상을 꾀하는 것이 좋으리라 판단된다.

2) 식물공장내 근권환경 조건이 상추의 광합성, 생육 및 잎끝마름 발에 미치는 영향

가) pH

뿌리를 통한 무기 성분의 유효성과 흡수에 중요한 인자중의 하나가 배양액의 pH로 이는 여러 요인에 의해 변화하지만 재배기간 중 작물 생육 단계에 따라, 또는 질소 흡수 패턴에 의해 pH는 영향을 받는다. 본 실험에서는 식물 공장에 적합한 반결구와 잎상추의 pH 처리로 상추의 생산성 및 잎끝마름 발생 정도를 알아보고자 인공광 병용형 벤로 온실에서 NFT 베드에 pH 4.5, pH 6.0, pH 7.5, 3처리하여 25일간 처리하였을 때 광합성과 증산률을 측정하였다.

반결구 상추와 잎상추의 pH 처리에 따른 광합성은 두 품종 모두 pH 6.0 처리에서 가장 활발했으며, pH 4.5와 pH 7.5는 낮은 2차 곡선을 나타냈다(Fig. 2-26). 그러나 기공저항은 품종간 차이를 보여 반결구 상추는 pH 처리간 차이가 없었으나,

잎상추는 pH 6.0 처리에서 가장 낮고, pH 4.5와 pH 7.5는 키집에 따라 pH에 의한 기공 저항의 영향은 무기이온의 흡수에 제한 인자로 작용할 수 있음이 추측되었다. 두 품종 상추의 증산률은 완전 전개잎이 미전개잎보다 높았으며, 확산 저항은 반비례하였다(Fig. 2-27). 반결구 상추 완전 전개잎의 증산률은 pH가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으나, 미숙잎은 증가 후 감소하여 광합성의 결과와 일치되는 경향을 보였다. 그러나 잎상추 완전 전개잎 증산률은 pH 4.5에서 가장 낮았으며, 미숙잎의 증산률은 pH 4.5에서 가장 높고 pH 7.5에서 낮았으나 반결구 상추의 증산률보다는 높았다. 반결구 상추 미전개잎의 확산저항은 pH 변화에 따른 완만한 곡선을 나타낸 반면, 잎상추는 pH 4.5와 pH 7.5에서 미전개잎 기공저항이 컸던 것과 같이 pH 7.5에서의 확산 저항도 컸다. 이상의 결과는 Sim(1999)이 잎상추의 배양액 pH가 3.0에서 6.5로 증가함에 따라 광합성은 증가하고 기공저항은 감소했다고 보고한 결과와 같았다.

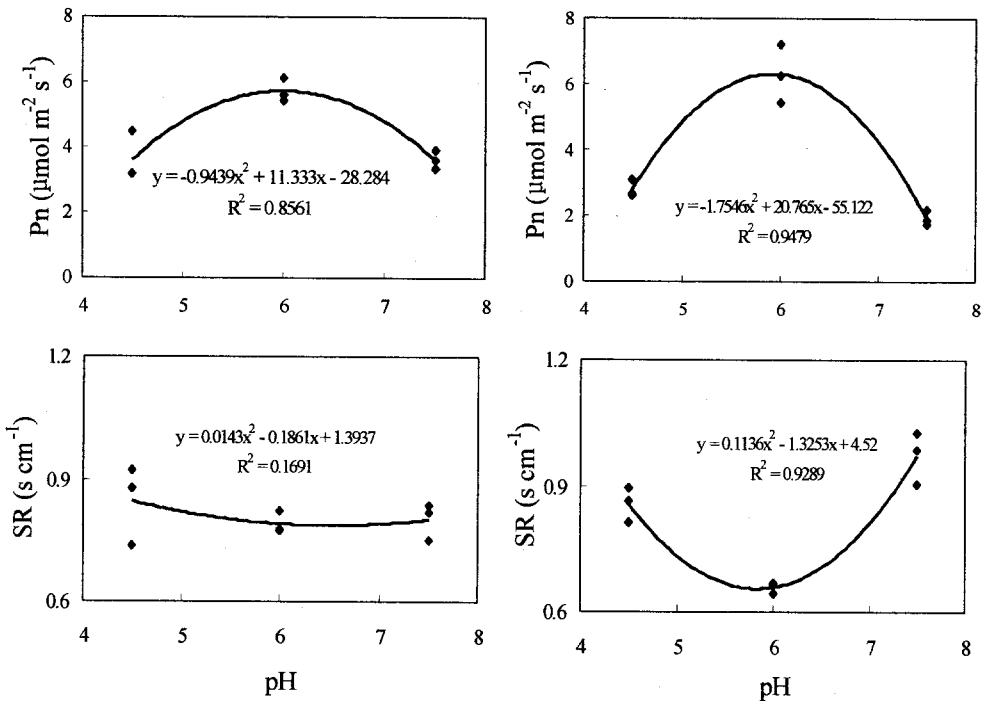


Fig. 2-26. Effect of pH of nutrient solution on photosynthesis (Pn) and stomatal resistance (SR) of butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

pH 처리에 의한 두 품종 상추의 광합성과 증산률의 결과는 지상부 환경 요인 중 온도와 습도 처리에서 얻어진 반결구 상추의 품질 저하를 가져왔던 잎끝마름 발생 원인과는 다른 것으로 pH 4.5의 잎상추에서 잎끝마름이 발생하는 결과를 가져왔다. 따라서 pH 처리에 따른 잎상추 잎끝마름이 잎 조직 강도에 미치는 영향을 알아보려고 이온 유출을 측정하였다(Table 2-42). 반결구 상추의 이온유출은 pH 6.0에서 가장 낮았으며, pH 4.5와 pH 7.0 처리간에는 차이가 없었다. 그러나 잎상추의 이온 유출은 pH 처리에 따른 이온 유출량이 차이가 없어 잎상추 pH 4.5의 잎끝마름 발생은 막 구조의 변화를 가져온 무기이온의 유출 증가보다는 pH가 뿌리로부터 두 품종 상추의 무기이온 흡수에 미친 영향과 뿌리 활력 정도가 더 큰 인자로 작용했으리라 생각된다.

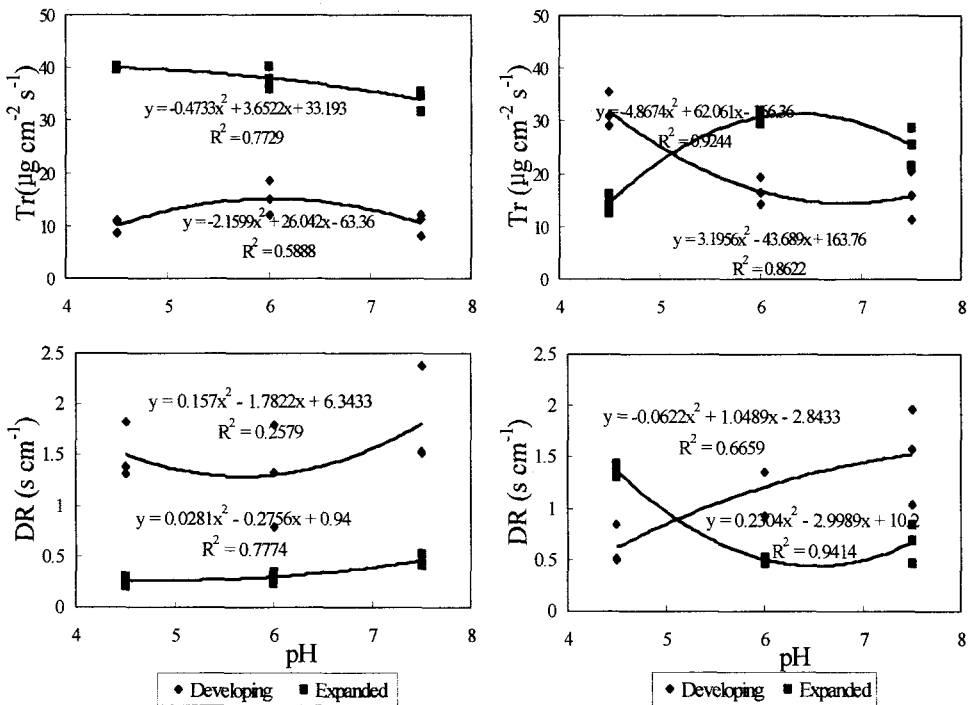


Fig 2-27. Effect of pH of nutrient solution on transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (DR) in developing and expanded leaves of butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

Table 2-42. Effect of pH of nutrient solution on ion leakage of butterhead and leaf lettuce at 25 days after treatment. (unit: dS m⁻¹)

Solution pH	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
4.5	0.058 a	0.030
6.0	0.042 b	0.037
7.5	0.057 a	0.034

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

다음은 pH 영향으로 인한 무기이온의 흡수와 엽록소 함량과의 관계를 알아보고자 측정한 결과(Table 2-43) pH 4.5의 반결구 상추 엽록소 함량은 pH 6.0과 pH 7.5 처리에 비해 2.2~2.5배 높았다. 잎상추의 엽록소 함량도 반결구 상추와 같이 pH 4.5 처리에서 가장 높고 pH 7.5 처리에서 가장 낮았다. 즉, 낮은 pH 처리에서 두 품종 상추의 엽록소 함량은 가장 높았다. 이는 낮은 pH에서 Fe, Zn, Cu, Mn 등의 용해도는 증가하며, 그 중에서 철은 광합성과 호흡과정에서 전자전달계의 여러 효소와 단백질 구성에 참여하는 원소로 낮은 pH에서 철의 유효도가 증가함에 따라 엽록소 함량이 증가한 것으로 생각된다.

Table 2-43. Effect of pH of nutrient solution on total chlorophyll content of butterhead and leaf lettuce at 25 days after treatment. (unit: g g⁻¹Fw.)

Solution pH	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
4.5	1.667 a ^z	0.931 a
6.0	0.759 b	0.894 b
7.5	0.663 b	0.775 c

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

반결구 상추의 pH 처리에 의한 생육은 최대 엽장, 최대 엽폭, 엽수 및 지상부 생체중은 처리간 차이가 없었다(Table 2-44). 그러나 지하부 생체중은 처리간 유의성이 인정되어 pH 6.0 처리에서 가장 높아 pH가 지하부 생육에 영향을 줌으로써 무기 이온의 흡수에 영향 인자로 작용할 수 있으리라 생각된다. 또한 pH 6.0 처리에서 반결구 상추 상대 성장률은 가장 빨랐으며, pH 7.5 처리에서는 성장 속도가 늦었지만 모든 처리에서 잎끝마름은 발생하지 않았다. 그러나 잎상추는 pH 처리에 따른 엽수의 차이가 생육에 영향을 줌으로써 pH 6.0 처리의 생육이 가장 높았고, 상대 성장률은 pH 4.5 처리에서 가장 늦었다. pH 4.5 처리에서 잎상추는 잎끝마름이 발생함에 따라 배지내 낮은 pH는 잎상추의 양분 흡수 저해로 인한 품질 저하를 가져왔으며, 품종간 차이를 나타냈다. pH 처리에 따른 반결구 상추는 pH에 의한 생육간 차이가 없었다. 이는 본 실험이 어느 정도 생육된 상태에서 실험이 수행된 영향을 받은 것으로 보이나 Bres와 Weston(1992)이 배양액의 pH가 상추의 무기이온 함량에는 영향을 줄 수 있으나 생육간에는 유의적 차이가 없다는 결과와는 같았다. 또한 pH 4.0 이하에서는 H⁺가 뿌리에 직접적인 해를 줄 뿐 아니라 Ca, Mg, K와 같은 양이온은 침전되어 결핍되기 쉬운데(Benoit, 1992) 잎상추의 pH 4.5에서 잎끝마름 발생은 Sim(1999)이 낮은 pH에서 잎상추의 엽내 칼슘 함량이 감소되었다는 보고와 같이 배양액의 pH에 의한 영향을 받아 무기이온의 흡수가 억제된 것으로 판단된다. 따라서 식물 공장과 같은 환경 제어형 고품질 재배관리에서 상추의 pH 범위를 5.5~6.5 범위를 유지하여 관리해야 하리라 좋을 것으로 판단되었다.

Table 2-44. Effect of pH of nutrient solution on growth characteristics and incidence of tipburn of butterhead and leaf lettuce^z at 25 days after treatment.

Sol. pH	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)		RGR ^y (g gday ⁻¹)	Tipburn (%)
				Shoot	Root	Shoot	Root		
Butterhead lettuce 'Omega'									
4.5	19.5	17.2	37.3	104.5	12.6	4.72 b ^x	1.04	0.067	0
6.0	20.6	18.5	38.7	118.5	13.0	5.01 a	1.12	0.068	0
7.5	20.9	18.2	35.7	111.3	12.9	4.78 b	1.05	0.062	0
Leaf lettuce 'Grand Rapids'									
4.5	19.1	17.2	14.0 c	77.8 b	12.3 b	3.67 b	0.89 b	0.057	12.5
6.0	20.5	19.0	23.3 a	116.4 a	15.5 a	5.98 a	1.27 a	0.075	0
7.5	20.4	19.1	19.7 b	104.3 a	12.7 b	5.76 a	1.06 b	0.076	0

^zTransplanted on August 18 and harvested on September 29, 1998.

^yRelative growth rate measured from August 26 to September 21, 1998.

^xMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

나) 전기전도도(EC)

지하부 환경 요인중 배양액의 전기전도도는 근권의 수분 포텐셜을 변화시키며, 이것이 지상부로의 양, 수분 흡수에 제한 인자가 되므로 수경재배에서 배양액의 pH와 EC 관리는 필수적 조건이라 할 수 있다. 특히 상추의 품질과 관련한 잎끝마름은 칼슘 이동이 물관을 통한 증산류와 근압류에 의해 이루어진다는 보고 (Clarkson, 1984; Palzkill과 Tibbitts, 1977)와 같이 배양액의 EC 수준에 따른 상추 품종간 체내 방어 반응으로서의 항산화 반응, 뿌리 활력, 기공 반응과 생육 결과를 통해 식물 공장에서의 상추 품질에 미치는 칼슘 영향을 알아보려고 실험을 수행하였다. 배양액의 EC에 의한 상추의 생육과 품질에 미치는 영향은 배양액의 무기 이온 총량으로 조절한 EC 처리와 NaCl로 조절한 EC 처리로 나누어 수행되었다. Ho와 Adams (1989)는 NaCl을 첨가하거나 다량원소의 총량으로 증가된 배양액의 EC 농도 증가로 인한 토마토의 수분 흡수 감소와 칼슘 축적 감소는 유사한 결과를 보였다고 함에 따라 중복되는 실험 방법은 제외하였다.

-무기이온 총량으로 조절한 EC

배양액의 EC 증가는 삼투압의 상승으로 뿌리로부터의 양, 수분 흡수가 억제됨에 따라 상추 품질 저하가 발생할 수 있으므로 이와같은 현상이 발생되기 이전의 체내 GR 활성 변화를 알아보기 위해 배양액으로 조절한 EC 수준별 반결구 상추와 잎상추의 미전개잎에서의 처리 시간에 따른 차이를 알아보았다(Fig. 2-28). 1.5 dS m⁻¹에서의 반결구 상추 GR 활성은 처리 21일까지 완만한 증가를 보인 반면, 4.5 dS m⁻¹와 9.0 dS m⁻¹의 높은 EC 처리의 반결구 상추 GR 활성은 처리 1일과 3일째는 약간 높은 경향을 보였다. 처리 5일째 9.0 dS m⁻¹는 1.5 dS m⁻¹에 비해 1.8배 높았으며, 처리 14일째까지는 처리 5일째와 같은 수준을 보이다가 처리 21일째 급격한 증가를 나타냈다. 이 시기는 반결구 상추 결구가 형성되어 잎끝마름이 발생한 시기로 GR 활성은 처리 5일째부터 증가함에 따라 상추의 체내 항산화 반응이 나타났으며, 잎끝마름이 발생함에 따라 뚜렷한 증가가 일어난 것으로 생각된다. 그러나 잎상추의 GR 활성은 반결구 상추와는 다른 반응을 보였다. 처리 1일째 잎상추 9.0 dS m⁻¹의 GR 활성은 1.5 dS m⁻¹에 비해 1.6배 높았으나 처리 7일째는 감소하기 시작하여 1.5 dS m⁻¹와 차이가 없었으나 처리 21일에는 다시 증가하는 경향을 보였다. 그러나 4.5 dS m⁻¹의 잎상추 GR 활성은 처리 5일째부터 증가하기 시작하여 처리 21일에는 1.5 dS m⁻¹에 비해 2.8배 높아 9.0 dS m⁻¹의 배양액보다 GR 활성이 높았다. 이것은 반결구 상추와 다른 GR 활성 변화로 pH에 대한 상추의 뿌리 생육 반응이 다른 것과 같이 높은 전기전도도에서 이미 체내 GR 활성이 저하된 것으로 보여진다. 또한 EC 증가에 따라 잎상추에서는 잎끝마름이 발생하지 않음으로써 품종간 차이를 보였으며, 잎상추가 잎끝마름에 강한 품종으로 판단되었다.

GR은 광합성 전자전달계에서 유래된 NADH에 의해 전자를 공급받아 항산화제인 글루타치온을 환원시키는 효소로 산화적 스트레스를 받았을 때 GR 활성은 증가하며, NADPH의 공급에 변화가 생길 경우 순광합성 속도 감소가 GR 활성의 유도를 저하시킨다고 알려지고 있다(Fozer 등, 1991; Smith 등, 1989).

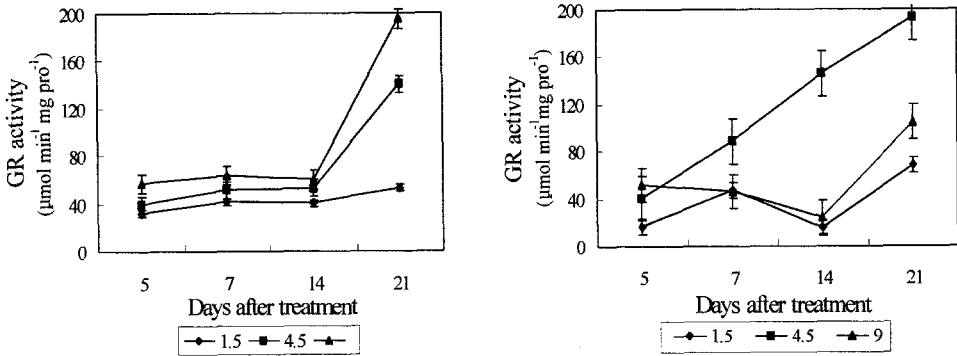


Fig. 2-28. Changes in glutathione reductase (GR) activity of butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) depending electrical conductivity.

배양액의 전기 전도도로 인한 양·수분 흡수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 뿌리 근활력을 측정하였다. 처리 1일째 4.5 dS m⁻¹에서 반결구 상추 근활력은 1.5 dS m⁻¹ 보다 낮았으나 처리 3일째 부터는 회복되기 시작하여 처리 14일째는 1.5 dS m⁻¹의 근활력과 같은 수준이었으며, 21일째는 1.5 dS m⁻¹보다 높았다(Fig. 2-29). 반면에 9.0 dS m⁻¹의 높은 EC에서는 처리 1일째의 근활력이 21.4 μg gDW⁻¹ h⁻¹으로 1.5 dS m⁻¹에 비해 3배나 높은 활성을 보인 후 2일째부터는 감소하기 시작하여 3일째 부터는 1.5 dS m⁻¹보다 낮아졌으나 처리 21일째에는 다시 증가하였다. 잎상추 EC 처리 경과에 따른 근활력은 처리 1일째부터 1.5 dS m⁻¹에 비해 4.5 dS m⁻¹는 3.9배, 9.0 dS m⁻¹는 6.6배나 높은 근활력을 나타냈다(Fig 2-29). 처리 2일째 부터는 높은 EC 처리에서 감소하기 시작하여 1주 후에는 1.5 dS m⁻¹에 비해 낮아졌다. 그러나 처리 2주째의 4.5 dS m⁻¹는 1.5 dS m⁻¹보다 근활력이 증가한 반면 9.0 dS m⁻¹는 감소 후 증가하는 경향을 나타냈다. 높은 EC에서 근활력은 처리 1일째 정상적인 EC 범위에서보다 높았지만 처리 2일째부터 감소함에 따라 높은 EC는 뿌리의 삼투포텐셜을 저하시켰으나 처리 2주째는 근활력이 증가함으로써 높은 염 농도에서 상추가 적응한 것으로 생각된다.

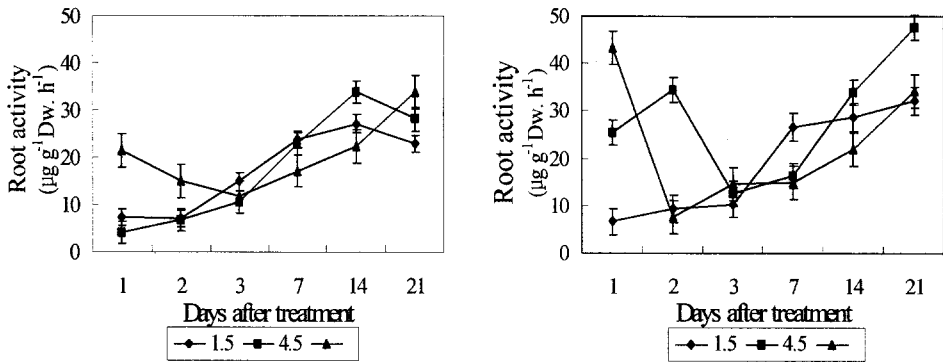


Fig. 2-29. Changes in root activity of butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) depending electrical conductivity.

배양액내 EC 처리 1주일 후 두 품종 상추의 이온 유출은 EC 수준이 높아짐에 따라 증가하였다(Table 2-45). EC 9.0 dS m⁻¹는 EC 1.5 dS m⁻¹에 비해 상추 잎 이온 유출이 2배 이상 증가하여 막 투과성의 변화가 일어남을 알 수 있었다. 이 시기 두 품종 상추의 9.0 dS m⁻¹에서의 근활력은 1.5 dS m⁻¹에 비해 낮았던 것으로 미루어 배양액의 높은 전기전도도는 지상부의 무기 이온 흡수에 영향을 준 것으로 생각된다.

Table 2-45. Effect of electrical conductivity (EC) of nutrient solution on ion leakage of butterhead and leaf lettuce at 7 days after treatment. (unit: dS m⁻¹)

EC (dS m ⁻¹)	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
1.5	0.33 b ^z	0.21 b
4.5	0.042 b	0.23 b
9.0	0.072 a	0.54 a

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

두 품종 상추의 엽록소 함량은 9.0 dS m⁻¹가 1.5 dS m⁻¹보다 모두 높아 처리 간 차이가 인정되었다. EC 수준이 높아짐에 따라 상추 잎의 엽색이 짙어지는 것이 관찰되었는데 이는 염농도가 높아짐에 따라 뿌리의 삼투 적응능력으로 인한 체

내 방어반응으로 생각된다. 그러나 EC 4.5 dS m⁻¹는 1.5 dS m⁻¹ 처리와 차이가 없는 것으로 보아 상추의 염에 대한 적응능력이 강함을 보였다(Meiri와 Plaut, 1985).

Table 2-46. Effect of electrical conductivity (EC) of nutrient solution on total chlorophyll content of butterhead and leaf lettuce at 14 days after treatment.

(unit: g g⁻¹Fw.)

EC (dS m ⁻¹)	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
1.5	0.87 b ²	1.01 b
4.5	1.05 b	1.20 b
9.0	1.47 a	1.47 a

²Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

EC 처리 3주째의 반결구 상추와 잎상추의 상대 수분함량은 두 품종 모두 배양액내 EC가 높아짐에 따라 감소하였다(Fig 2-30). 감소 기울기는 반결구 상추가 컸다. 배양액내 EC의 증가는 뿌리의 삼투 포텐셜을 저하시키므로(Ho와 Adams, 1989; Schwarz, 1995) 수분 흡수 역제가 엽내 상대수분함량을 감소시킨 것으로 생각된다.

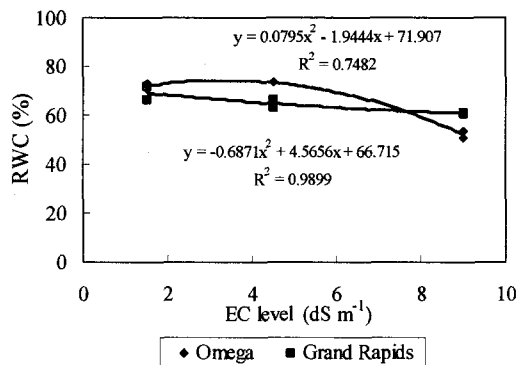


Fig. 2-30. Effect of electrical conductivity (EC) of the nutrient solution on relative water content (RWC) of butterhead 'Omega' and leaf lettuce 'Grand Rapids' at 3 weeks after treatment.

반결구 상추는 배양액의 EC가 높아짐에 따라 광합성은 완만한 감소를 보였으나 기공저항과 수분이용효율은 크게 증가하였다(Fig 2-31). 수분이용효율의 증가는 water stress로 인한 체내 CO₂ gas 교환을 높이기 위한 일종의 방어기능으로 해석되었다. 그러나 잎상추의 광합성은 배양액의 EC가 높아짐에 따라 급격한 감소를 보였으며, 기공저항과 수분이용효율은 완만한 감소를 보여 반결구 상추와는 다른 기공반응을 보였다. Rao 등(1987)은 수경재배로 배양액 농도를 달리했을 때 해바라기는 높은 EC에서 수분 스트레스를 받아 광합성이 저하했음을 보고하여 본 실험과 일치했는데, 이는 광합성에 관여하는 ATP효소 활성이 정상에 비해 너무 높게 증가했기 때문이라고 했다. 또 Nonami 등(1991b)은 토마토의 배꼽썩음과가 발생한 잎의 광합성 저하는 엽록체 대사 기능이 상실한 것일 수 있다고 했다. 염에 영향을 받은 식물은 일반적으로 생육이 더디지면서 잎은 녹색을 띠면서 엽육이 두꺼워지는 형태적 특징을 가지는 데, Schwarz(1995)는 이 때 식물체내 수분 보유능력을 높이려하는 체내 방어 반응이 일어난다고 보고한 것과 같이 반결구 상추에서는 높은 EC에서 수분이용효율이 높았으나 잎상추에서는 4.5 dS m⁻¹에서는 수분 보유력이 높았으나 염 농도가 높은 9.0 dS m⁻¹에서는 감소하여 상이한 결과를 얻었다. 이는 잎상추의 처리시간 경과에 따른 9.0 dS m⁻¹에서의 체내 GR 활성의 감소, 근활력의 감소가 초기에 일어남에 따른 반결구와는 다른 염 피해에 대한 방어반응으로 생각된다.

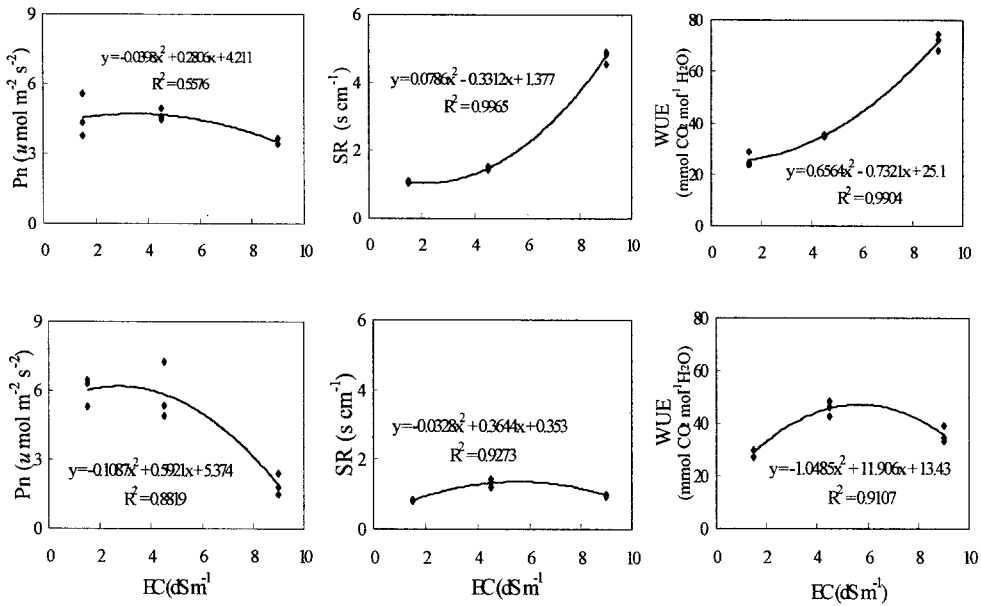


Fig. 2-31. Effect of electrical conductivity (EC) of nutrient solution on photosynthesis (Pn), stomatal resistance (SR) and water use efficiency (WUE) in expanded leaves of butterhead 'Omega' (upper) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (lower) at 10 days after treatment.

배양액의 높은 염 농도에서의 상추 양, 수분의 흡수 영향은 증산률과 밀접한 관계가 있으므로 완전 전개잎과 미전개잎을 구분하여 증산률을 측정하였다(Fig. 2-32). 반결구 상추 완전 전개잎의 증산률은 높은 EC에서도 증산률이 높은 경향을 보여 완전 전개잎은 높은 배양액 EC에서도 증산이 이루어지지만, 미전개잎에서의 증산률은 감소함에 따라 이것이 배양액의 EC의 영향인지, 아니면, 결구 형성에 측정된 결과로 내부의 높은 습도가 더 큰 작용을 한 것인지를 정확하게 판단하기는 어려우나 칼슘과 같은 무기이온의 흡수에는 영향을 주리라 생각된다.

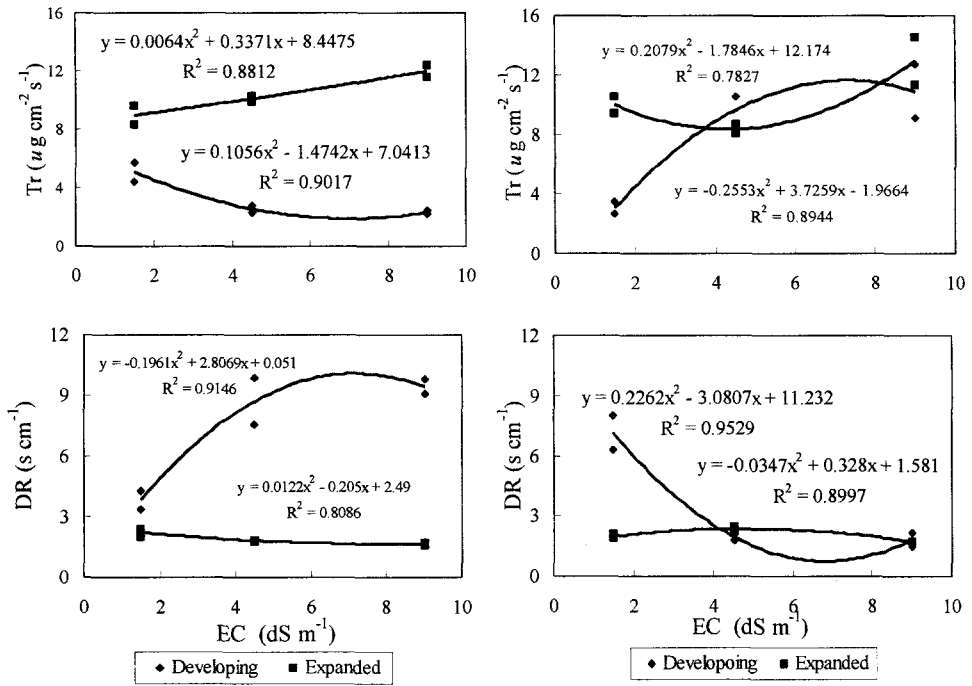


Fig. 2-32. Effect of electrical conductivity (EC) of nutrient solution on transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (DR) in developing and expanded leaves of butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 10 days after treatment.

잎상추의 완전 전개잎의 증산률은 배양액의 EC 증가에 따라 감소 후 회복되는 경향을, 확산저항은 감소하였다. 그러나 미전개잎은 4.5 dS m^{-1} 에서는 증가하였으나 9.0 dS m^{-1} 에서는 감소하여 반결구 상추와 같은 경향을 보였으며, 확산저항은 급격한 감소 후 회복되는 경향을 보임으로, 4.5 dS m^{-1} 에서도 증산률에 영향을 받은 것으로 판단되었다. 그러나 미전개잎은 높은 EC에서의 낮은 증산률에도 불구하고 잎상추에서는 잎끝마름이 발생하지 않은 점으로 보아 이는 품종이 가진 형태적 특성과 함께 유전적 특성이 함께 작용하여 잎끝마름에 강한 것으로 판단되었다.

처리 3주 후 배양액의 EC에 의한 반결구 상추의 생육은 1.5 dS m^{-1} 와 4.5 dS

m⁻¹는 생체중은 차이가 없었으나 높은 염 농도인 9.0 dS cm⁻¹에서는 염수의 감소와 함께 생체중의 감소가 두드러졌다(Table 2-47). 잎끝마름은 1.5 dS m⁻¹에서는 전혀 나타나지 않았으나 4.5 dS m⁻¹에서는 54.5%, 9.0 dS cm⁻¹에서는 71%의 잎끝마름 발생률이 높았다. 그러나 4.5 dS m⁻¹에서의 반결구 상추 생체중은 1.5 dS m⁻¹와 차이가 없었으나 잎끝마름이 발생함으로써 품질의 저하만을 유도했다.

Table 2-47. Effect of electrical conductivity (EC) of nutrient solution on growth characteristics and incidence of tipburn of butterhead and leaf lettuce² at 3 weeks after treatment.

EC (dS m ⁻¹)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)		Tipburn (%)
				Shoot	Root	Shoot	Root	
Butterhead lettuce 'Omega'								
1.5	21.4 a ^y	17.2 a	38.5 c	144.3 a	17.4 b	6.25 ab	1.40 b	0
4.5	15.0 a	17.5 a	63.5 a	146.5 a	25.0 a	8.46 a	1.96 a	54.5
9.0	14.3 b	15.0 b	49.0 b	85.6 b	18.6 b	5.33 b	1.48 b	71.4
Leaf lettuce 'Grand Rapids'								
1.5	17.7 b	20.0 a	23.5 b	116.9 a	23.9 a	6.82 b	1.44 a	0
4.5	26.2 a	18.3 ab	23.5 b	130.9 a	28.4 a	9.51 a	1.90 a	0
9.0	22.3 ab	17.2 b	26.5 a	124.3 a	24.7 a	10.5 a	1.79 a	0

²Transplanted on May 21 and harvested on June 27, 1998.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

잎상추의 생육은 배양액 EC 처리에 따른 염수는 9.0 dS m⁻¹에서 오히려 높았으나 생체중은 처리간 차이가 없었으며, 잎끝마름이 발생하지 않음에 따라 이는 결구가 형성되지 않는 형태적 차이 뿐 아니라 EC에도 강한 잎상추의 유전적 특성이 함께 작용하여 잎끝마름 발생에 강한 것으로 나타났다고 생각된다.

그러나 Nonami 등(1995)는 배양액의 높은 EC에서 토마토 배꼽썩음과 발생이 시작되는 과실의 칼슘 이온 농도는 정상 과실과 비교했을 때 칼슘 이온의 분배나

농도에서 차이가 없었으며, 품종에 따른 칼슘 흡착능을 비교했을 때 배꼽썩음과와 칼슘 흡착과는 관계가 없는 것으로 나타났다. 이는 과실의 배꼽썩음과 발생은 칼슘 결핍이 직접적인 원인이기보다는 스트레스에서 유전자 발현으로 조절된 대사 불균형에 의한 발생일 수 있다고 했다. 본 실험에서 상추의 품종간 유전적 특성을 실험하지 않았으나 EC 처리에 따른 잎상추의 생육 차이가 없는 것으로 보아 이는 스트레스에 강한 품종이라고 생각된다.

-NaCl로 조절된 EC

배양액의 총 무기 이온 함량으로 조절된 EC 처리에서 반결구 상추의 잎끝마름은 발생하였으나 생육은 9.0 dS m^{-1} 를 제외하고는 처리간 차이가 인정되지 않음에 따라 잎끝마름이 발생한 반결구 상추의 정단부로부터 15매의 엽수를 남기고 식물이 흡수하는 수분량을 측정하여 생육, 무기이온의 흡수와 잎끝마름 발생을 밝혀보고자 실험을 수행하였다.

처리 20일 후 배양액 염 농도에 의한 반결구 상추의 생육은 배양액내 EC 상승에 따라 최대 엽장, 최대 엽폭, 엽수, 생체중이 유의하게 감소하였으며, 식물체로부터 흡수된 총 물량도 유의하게 감소하였다(Table 2-48). 이는 배양액의 삼투압이 높아짐에 따라 지상부로의 수분 흡수는 EC 1.5 dS m^{-1} 에 비해 EC 9.0 dS m^{-1} 에서 55% 감소되었고, 생체중은 71% 감소되었다. 또한 상추가 염에 어느 정도 강한 종이지만(Meiri와 Plaut, 1985) 높은 EC 농도에서는 삼투포텐셜 저하로 인해 상위엽은 엽색이 짙어지고 하위엽은 노화되면서 극심한 생육 억제 현상을 나타냈다. 즉 앞서 수행된 실험이 생육이 진전되어 염에 대한 적응력을 보인 상태에서 수행된 반면 본 실험은 일정한 엽수에 염 처리를 함에 따라 염에 대한 반결구 상추의 생육 저하가 뚜렷하게 나타난 것으로 생각된다. 이와같은 배양액의 높은 염 농도로 인한 엽수의 감소는 실제 광합성 면적의 감소를 의미하는 것으로 생육 억제가 일어난 것으로 생각된다. 또한 식물체내 칼슘 이동이 주로 물관을 통한 증산류와 근압에 의해 이루어질 때(Guttidge 등, 1981; Palzkill and Tibbitts, 1977) 뿌리를 통한 수분 흡수 감소는 배양액의 높은 염 농도가 근압을 감소시킴으로써 반결구 상추의 결구시기 정단부나 내부 결구부와 같은 증산이 낮은 조직에서는 칼슘 이동 및 흡수가 충분히 이루어지지 못함에 따라 잎끝마름이 발생할 수 있음을 보여

주었다. 이와같이 염에 의한 식물체로의 수분 흡수 감소와 생육의 감소는 Al-Harbi와 Burrage(1992)와 Atta-Aly 등(1992), Schwarz와 Kuchenbuch (1998) 등의 연구결과와도 일치하였다.

Table 2-48. Effect of electrical conductivity (EC) by addition NaCl of nutrient solution on growth characteristics and total water uptake of butterhead lettuce 'Omega'^z at 20 days after treatment.

EC (dS m ⁻¹)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Fresh wt.(g plant ⁻¹)		Total water uptake (ml plant ⁻¹)
				Shoot	Root	
1.5	16.3 a ^y	13.5 a	43.0 a	97.8 a	16.7 a	1516.5 a
4.5	13.7 b	12.5 ab	35.3 b	53.9 b	12.4 b	1016.3 b
9.0	13.3 b	11.0 b	26.7 c	28.2 c	9.8 c	683.8 c

^zTransplanted on January 11 and harvested on February 4, 1999.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

생육 조사 후 반결구 상추를 엽위별로 채취한 후 엽내 무기이온 함량을 분석하였다(Table 2-49). 배양액의 1.5 dS m⁻¹에서 9.0 dS m⁻¹로 상승함에 따라 엽내 나트륨 함량은 증가하였으며, 가리, 칼슘과 마그네슘 함량은 유의하게 감소하였다. 엽위별로 무기양이온 함량은 상위엽이 하위엽보다 모두 낮았으며, 특히, 칼슘 함량은 엽위에 따른 무기이온의 함량이 뚜렷한 차이를 보였다. 엽위에 따른 칼슘의 흡수와 축적은 Francois 등(1991)이 artichokes bud의 내부 포엽 칼슘 결핍은 엽 농도 증가와 직접적인 관계가 있다고 보고한 결과와 일치함으로써 엽위간 칼슘의 이동은 엽 농도에 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 배양액내 EC 증가는 K/Ca비, Mg/Ca비, Na/Ca비 간에도 증가를 보여, 높은 엽 농도는 상추의 엽 부위에 따른 무기이온의 이동과 흡수에 영향을 주었다. Kent와 Lauchli(1985)에 의하면 배양액내 칼슘 이온이 생육에 적합한 농도로 있다해도 엽 농도 증가로 Na/Ca비가 증가하면 식물체내 칼슘 농도는 충분하지 않다고 하였다. 또한 Ho와

Hand(1996)는 토마토의 질산태 질소와 인산함량에 따른 배꼽썩음과 발생은 뿌리의 칼슘 함량보다는 과실 생육기 양분간의 상호작용이 더 큰 인자로 작용했다고 보고함으로써 배양액내 염 농도 증가에 따른 양이온간의 상호작용에 의해 칼슘의 부적절한 분배가 잎끝마름 발생을 야기할 수 있음을 본 실험 결과에서도 얻었다.

Table 2-49. Effect of electrical conductivity (EC) by addition NaCl of nutrient solution on mineral nutrient content of butterhead lettuce 'Omega'.

EC (dS m ⁻¹)	Leaf position ^z	K -----	Ca %	Mg -----	Na	K/Ca -----	Mg/Ca ratio	Na/Ca ----
1.5	upper	5.098 e ^y	0.851 d	1.665 bc	0.134 h	5.99	1.96	0.16
	middle	7.985 a	1.401 b	1.814 a	0.144 h	5.70	1.29	0.11
	lower	5.690 cd	3.830 a	1.801 a	0.230 g	1.49	0.47	0.06
4.5	upper	3.918 fg	0.629 e	1.650 bc	0.746 f	6.23	2.62	1.10
	middle	6.165 c	1.086 c	1.714 b	1.885 e	6.01	1.67	1.74
	lower	7.463 b	3.702 a	1.845 a	2.379 d	2.02	0.50	0.64
9.0	upper	3.387 g	0.425 f	1.544 d	2.447 c	7.97	3.63	5.76
	middle	4.136 e	0.837 d	1.605 cd	3.072 b	4.94	1.92	3.67
	lower	5.303 de	1.398 b	1.676 bc	3.694 a	3.79	1.20	2.64

^zUpper, middle and lower leaves refer to 1st to the 7th, 10th to the 15th and 20th to the 25th true leaves from growing apex of lettuce, respectively.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

앞서 지상부 환경 중 상대습도에 따른 무기 이온 함량을 분석한 결과 반결구 상추에서의 잎끝마름 발생은 K/Ca비에 영향을 받고 이 값이 7.1을 넘었을 때 발생한 것으로 보아 본 실험에서 잎끝마름 발생을 관찰하지는 못했지만 9.0 dS m⁻¹에서의 K/Ca비값이 7.97을 나타냄에 따라 칼슘 흡수가 크게 억제되어 분배가 원활하게 이루어지지 않고 잎끝마름이 발생할 수 있음을 재확인할 수 있었다. 또한 본 실험에서는 높은 염 농도로 인한 극심한 생육저하로 잎끝마름 발생이 관찰되지 않았는데, 이는 잎끝마름은 염 농도 뿐 아니라 pH, 용존산소 등의 지하부 요

인과 지상부 환경요인-광, 온도, 습도 등-의 복합적인 환경요인에 의해 발현된다고 생각된다.

Table 2-50은 식물체로부터 흡수된 물량과 엽내 무기이온 함량간의 상관 결과이다. 식물체가 흡수된 총 물량은 다른 무기양이온에 비해 상대적으로 이동성이 빠른 엽내 K 이온과 정의 상관을 보임에 따라 같은 1가 이온인 나트륨 함량과는 부의 상관을 나타냈다. 또 흡수된 총 물량과 엽내 K/Ca비는 부의 상관을 보임에 따라 칼슘 이동이 도관의 물 흐름에 따라 이루어짐으로써 간접적으로 칼슘과 가리 이온간의 상호작용이 일어난 것을 알 수 있다(Guttidge 등, 1981; Marshner, 1995). 고농도의 염류농도로 인한 수분 흡수 저해는 칼슘을 비롯한 가리, 마그네슘의 흡수와 이동에 영향을 주었으며, 특히 K/Ca비와 상관이 인정되어 상추의 칼슘 불균형에 의한 잎끝마름은 다른 양이온에 비해 가리 이온과 길항관계가 있음을 보여주었다.

Table 2-50. Correlation coefficients between mineral nutrients of leaves and water uptake of butterhead lettuce 'Omega'.

	K ^z	Ca	Mg	Na	K/Ca	Mg/Ca	Na/Ca
Water uptake	0.931**	-0.567**	-0.401*	-0.648**	-0.952**	0.252	0.441*

^zMineral nutrient(K, Ca, Mg, Na) in lettuce leaves.

이러한 결과는 Bar-Tal과 Pressman(1996)이 토마토의 배꼽썩음과 발생과 K/Ca 비와는 상관관계가 인정된다고 보고한 결과와 일치하였으며, NaCl이 첨가된 고농도의 배양액은 Na 이온의 증가로 뿌리로부터의 수분 흡수 감소, 극심한 생육 저하가 부위별 칼슘 흡수 감소, K와 Mg과 같은 다른 양이온의 흡수를 억제한 것으로 Ho와 Adams(1989), Kirkby와 Pilbeam(1984)의 결과와도 일치하였다.

다) 용존산소 농도

배양액의 용존 산소는 뿌리 호흡을 촉진시키므로 양, 수분 흡수의 영향 인자가 되므로 조절된 환경에서 상추의 계획 생산과 품질 향상을 위해서는 적정 용존 산소 범위가 설정되어야 할 것이다. 그러나 본 실험은 용존 산소 농도의 영향이 품질과 관련한 무기이온의 흡수가 잎끝마름 발생에 미치는 영향을 증산률과 근활력, 생육 결과를 토대로 유추해보고자 용존산소 농도를 3처리하여 담액에서 수행하였다.

반결구 상추와 잎상추의 증산률은 용존산소 농도가 높아짐에 따라 유의하게 증가하였으며, 확산저항은 감소하였으며, 뿌리 활력도 $7\sim 8\text{mg L}^{-1}$ 처리에서 가장 높았다(Table 2-51). 낮은 용존산소에서 반결구 상추 증산률은 잎상추에 비해 1.8배 높고, 확산저항은 2.1배 이상 낮아 품종간 차이를 보였다. 한편 두 품종 상추의 용존산소 처리에 따른 증산률이 처리간 유의한 수준을 나타냈음에 비해 확산저항은 잎상추의 $5\sim 6\text{mg L}^{-1}$ 처리와 $7\sim 8\text{mg L}^{-1}$ 처리간에 차이가 없어 확산저항외에 다른 저항이 관여했으리라 생각된다. Sim(1999)은 잎상추의 용존산소 농도가 2mg L^{-1} 에서 7mg L^{-1} 로 증가함에 따라 광합성과 증산률의 증가가 뚜렷하였고 $2\sim 3\text{mg L}^{-1}$ 처리는 가장 낮은 광합성과 증산률을 나타내 본 실험과 일치하는 결과를 보였다.

두 품종 모두 용존산소 농도가 높아짐에 따라 엽수의 증가가 뚜렷해짐으로써 지상부 생체중과 건물중의 증가가 인정되었으며, 근중의 차이가 두드러졌다(Table 2-52). 이는 물리적 방법에 의한 용존산소의 처리는 근권의 뿌리 기능을 활성화시켜 지상부 생육에 영향을 준 것으로 보여진다(Namiki, 1991).

Table 2-51. Effect of dissolved oxygen (DO) concentration of nutrient solution on transpiration rate, diffusive resistance and root activity of butterhead and leaf lettuce at 15 days after treatment.

DO conc. (mg L ⁻¹)	Transpiration rate ^z (μ g cm ⁻² s ⁻¹)	Diffusive resistance (s cm ⁻¹)	Root activity (mg gDw ⁻¹ hr ⁻¹)
Butterhead lettuce 'Omega'			
2~3	5.181 c ^y	3.097 a	1.612 c
5~6	6.767 b	2.247 b	2.114 b
7~8	9.861 a	1.540 c	4.283 a
Leaf lettuce 'Grand Rapids'			
2~3	2.814 c	6.667 a	1.828 c
5~6	4.542 b	2.613 b	2.705 b
7~8	6.783 a	2.187 b	3.622 a

^zMeasuring conditions : 23.8~26.5°C leaf temp., 839~989.5 μ mol m⁻² s⁻¹ PPFD, 32±2 % RH.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

이와같이 배양액내 통기량을 늘리는 물리적 방법을 이용한 용존산소의 증가는 두 품종 상추의 증산률과 뿌리 활력을 증가시키므로 지상부로의 양·수분 흡수, 이동을 원활하게 할 수 있으며, 조절된 환경에서의 상추 재배는 적절한 용존 산소가 중요한 인자로 작용할 수 있으리라 판단된다. 그러나 용존산소 처리에 따른 상추의 잎끝마름은 발생하지 않았다. 이는 실험 실시 기간이 10월 중순에 이루어짐으로써 이 기간 중의 환경조건이 상추 재배에 적합한 20~25°C 범위의 서늘하고 상대습도도 60% 내외의 적기에 이루어지므로써 품질 저하를 관찰하지 못한 것으로 보아 상추의 품질은 재배 환경과 생육 단계가 중요한 인자로 주목해야 할 것이다. 또한 높은 용존산소 처리의 상추의 생육은 다른 처리에 비해 뚜렷한 차이를 보였는데, 물리적 방법에 의한 통기량의 증가가 뿌리 양, 수분의 흡수를 원활하게 함에 따라 성장속도를 빨리 유도한다면 이에 대한 적정 범위의 용존산소 농도가 구명되어야 할 것으로 생각된다.

Table 2-52. Effect of dissolved oxygen (DO) concentration of nutrient solution on growth characteristics and incidence of tipburn of butterhead and leaf lettuce^z at 15 days after treatment.

DO con. (mgL ⁻¹)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)		Tipburn (%)
				Shoot	Root	Shoot	Root	
Butterhead lettuce 'Omega'								
2-3	12.0 c ^y	12.0 c	26.5 c	58.7 c	8.5 c	3.92 c	0.88 c	0
5~6	16.8 b	16.0 b	33.5 b	101.8 b	13.3 b	5.05 b	1.02 b	0
7~8	18.5 a	20.0 a	40.0 a	155.3 a	17.0 a	7.45 a	1.22 a	0
Leaf lettuce 'Grand Rapids'								
2~3	21.0	15.5	22.5 b	105.0 b	15.0 b	6.25 c	1.23 c	0
5~6	19.3	16.5	25.5 b	127.8 b	16.6 b	7.04 b	1.31 b	0
7~8	19.0	16.8	33.0 a	160.7 a	17.8 a	9.02 a	1.49 a	0

^zTransplanted on October 12 and harvested on November 4, 1998.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

본 실험에서 낮은 용존산소 농도 처리의 상추 뿌리는 활력이 저하되고, 뿌리가 약간 갈변하면서 높은 용존산소 농도 처리의 뿌리보다 잔뿌리의 발생이 적어지는 것을 관찰하였다. 이는 뿌리 세포벽에 리그닌과 슈베린과 같은 2차 세포막질이 축적된 것으로 세포내로의 수분이나 배양액의 양분 흡수를 제한 할 수 있는 요인으로 작용할 수 있다고 생각된다. 이와같이 낮은 용존산소에서 뿌리 활력 저하는 Chun과 Takakura(1994)가 상추 수경재배에서 낮은 용존 산소 농도는 뿌리의 호흡속도가 감소했음을, Neuman과 Smit(1991)은 낮은 용존 산소 농도에서 완두의 엽 수분포텐셜이 떨어지고, 기공폐쇄가 일어났으며, Yoshida 등(1996)은 오이 수경재배에서 저 산소 농도에서 잎과 뿌리의 생육은 저하하였으나 엽수의 증가는 없

있음을 보고하여 상이한 결과를 보였다. 또한 Guo와 Shoji(1997)는 인공광원에서 8일동안 용존산소와 배양액의 온도를 달리하여 오이와 토마토를 재배했을 때 토마토는 배양액의 온도와 상관없이 2ppm 이하에서는 생육이 떨어졌으며, 엽신의 함수량과 무기성분농도의 저하를 가져왔다. 그러나 오이는 33℃에서는 2ppm이하에서 생육의 억제를 가져왔으나 25℃에서는 1ppm에서도 정상적인 생육을 유지함에 따라 작물 종과 배양액의 온도에 따라 용존산소 농도는 상이할 수 있음을 보고했다. 본 실험의 결과와 이상의 보고들을 종합해 볼 때 용존 산소 함량 증가는 뿌리의 호흡을 촉진하고 작물의 양·수분 흡수 및 생육 향상을 이룰 수 있으나 앞으로는 상추의 재배 환경을 복합시킨 양·수분 흡수 패턴과 함께 성장속도와의 관계를 밝힘으로써 고품질 생산을 위한 적정 용존산소 범위의 설정을 위한 실험이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

이상의 실험 결과를 종합하여 재배 환경 요인에 의한 반결구 상추와 잎상추의 품질 저하를 가져온 잎끝마름의 발생 원인을 도식화하였다(Fig. 2-33). 지상부 환경요인인 고온 처리는 상추의 성장속도를 빠르게 유도함으로써 칼슘의 이동이 작물의 성장속도를 따라가지 못함에 따라 잎끝마름이 발생하였다. 다습한 조건에서 반결구 상추는 높은 광합성에도 불구하고 낮은 증산률과 내부잎의 K/Ca비가 높은 처리에서 조직내 칼슘의 원활한 분배가 이루어지지 못함에 따라 잎끝마름이 발생하였으나 잎상추는 습도에 의한 영향을 받지 않았다. 잎상추는 배양액의 낮은 pH에서, 배양액내 칼슘과 양이온간의 부적절한 비율로 칼슘 흡수는 저해받아 생육의 감소와 잎끝마름이 발생하였다. 또한 배양액의 EC 증가로 인한 식물체로의 수분 흡수가 감소되고 엽내 칼슘 함량이 감소됨에 따라 엽내 K/Ca비는 증가하였으며, 잎끝마름 발생도 증가하였다. 이와같은 잎끝마름 발생부위는 낮은 증산 조직인 미전개잎에서 발생하였으며, 이들 조직은 세포벽 조직의 강도를 약화시키면서 막투과성의 변화를 일으켜 칼슘이 부족하였을 때는 이온 유출이 증가하였으며, 항산화 효소인 GR 활성을 급격히 증가시켰다.

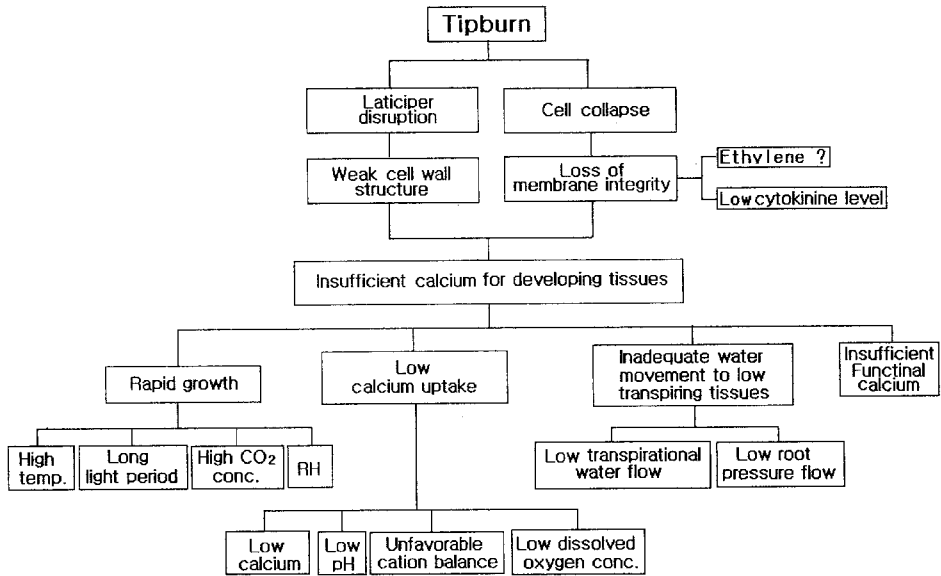


Fig. 2-33. A diagrammatic model for Ca uptake and incidence of tipburn in lettuce.

잎끝마름 증상은 어린잎 선단부를 중심으로한 부위가 수침상으로 변하면서, 갈색 또는 흑색으로 변해 고사해 조직의 붕괴를 가져왔다. 즉, 상추의 품질을 저하시킨 잎끝마름은 칼슘이 부족한 조건, 근권의 칼슘은 충분하나 흡수를 억제하는 조건(pH 저하, 이온 불균형), 칼슘의 흡수를 저해하는 다습조건이나 근권의 높은 EC에서, 칼슘의 조직내 분배가 이루어지지 못하는 성장속도가 빠른 조건(온도, 광량, CO₂ 농도, 상대습도) 등에서 발생하였으며, 품종간에는 결구가 형성되는 반결구상추에서 발생률이 높아 종간의 형태적 특성과 유전적 특성이 동시에 영향을 미친 것으로 생각된다.

마. 철함량이 높은 기능성 엔디브 생산기술개발

철은 체내 모든 세포중에 존재하며 시토크롬, 산화효소, 헤모글로빈, 미오글로빈과 같은 효소중에 존재한다. 성인이 하루에 필요로 하는 철의 양은 남자는 10 mg, 여자는 18 mg이며 성인기, 임신기, 수유기등에는 다량의 철이 요구되는데 그렇지 못하면 철분 결핍성 빈혈이 발생한다고 하였다(심, 1992).

그러므로 체내에 일정량의 철분을 유지하기 위해서는 철정제, 철강화된 음식물이나 철흡수를 촉진시키는 식품을 섭취하여 철의 필요량을 섭취해야만 한다. 철은 동·식물성 식품에 널리 함유되어 있으며 간장, 난황, 콩류, 육류, 녹엽채소 등에 많다. 그러나 식품중의 철의 형태는 유기태 화합물과 무기태 화합물로 크게 나누어진다. 유기태 화합물중에서 중요한 것으로는 헤모글로빈과 미오글로빈을 구성하는 heme철이 있으며, 무기태 화합물은 제일철(Fe^{2+}) 화합물과 제이철(Fe^{3+}) 화합물이 있다. 이들 철이 흡수될 때 heme철은 철 porphyrin 그대로 흡수되며, 무기태 화합물은 위액의 HCl에 의하여 용해되어 제일철 만이 흡수된다. 식품중의 Fe의 흡수율은 그 형태와 위액에 대한 용해성 등에 의하여 식품의 종류에 따라 크게 다르다.

예를 들어 시금치의 경우 Fe 2 mg을 섭취할 경우 1.8 % (투여량에 대한 백분율)가 인체에 흡수되고 양상추의 경우 1~1.7 mg 일 때는 5 %가 흡수된다고 하였다 (심 과 양, 1992).

따라서 본 실험은 수경재배의 장점인 근권환경을 조절하여 수확기에 단기간동안 흡수가 용이한 철을 고농도로 처리함으로써 엽내 철함량을 증가시켜 철이 강화된 기능성 채소를 개발하고자 수행하였다. 엔디브를 공시작물로 하고 철의 공급원으로는 ammonium ferric citrate (AFC)로 하였고 공급한 철의 농도는 $50 \text{ me}\cdot\text{L}^{-1}$ 과 $100 \text{ me}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 처리하였다.

AFC는 낮은 pH에서 흡수가 잘 되므로 pH를 3.0과 4.0으로 하였고, 처리시간을 12시간 단위로 하여 엽내 철의 축적량을 보았다.

Table 2-53. Effect of pH 3 and Fe concentration of ammonium ferric citrate solution on the Fe, mineral content in endive after soaking the root

		Fe 50mg · L ⁻¹					Fe 100mg · L ⁻¹				
		Fe	Cu	Mn	P	Mg	Fe	Cu	Mn	P	Mg
		-----mgL ⁻¹ -----			-----%----		-----mgL ⁻¹ -----			-----%----	
0h	T	67(100%)	16.2	21.2	0.47	0.32	67(100%)	-	-	-	-
	R										
12h	T	96(142%)	16.8	19.0	0.48	0.31	145.2(217%)	16.6	21.0	0.44	0.30
	R	983	47.6	26.0	0.62	0.56	2013	41.0	24.8	0.61	0.32
24h	T	101(151%)	16.4	19.0	0.47	0.28	166.2(248%)	17.0	10.2	0.44	0.26
	R	3790	37.2	13.0	0.52	0.23	3269	38.2	17.2	0.58	0.27
36h	T	156(233%)	25.4	26.4	0.48	0.28	139.4(208%)	16.4	14.4	0.47	0.28
	R	3384	50.4	21.0	0.80	0.24	2686	50.2	20.6	0.70	0.22
48h	T	606(904%)	22.0	29.2	0.38	0.23	266.6(398%)	23.4	13.8	0.46	0.33
	R	2457	42.2	14.4	0.52	0.19	3680.0	57.9	10.4	0.34	0.13

실험 결과를 보면, 우선 pH 3.0에서는 Fe 50 me·L⁻¹ 처리에 따른 엽내 철 함량은 시간이 경과됨에 따라 계속 증가하여 48시간 후에는 606 me·L⁻¹가 되어 대조구에 비해 900 %의 증가를 보인 반면에 100 me·L⁻¹ 하에서는 증가폭이 크지 않아 약 400 % 증가율을 보였다 (Table 2-53).

Table 2-54. Effect of pH 4 and Fe concentration of amonium ferric citrate solution on the Fe, mineral content in endive after soaking the root

		Fe 50mg · L ⁻¹					Fe 100mg · L ⁻¹				
		Fe	Cu	Mn	P	Mg	Fe	Cu	Mn	P	Mg
		-----mgL ⁻¹ -----	-----%-----			-----mgL ⁻¹ -----	-----%-----				
0h	T	67(100%)	16.2	21.2	0.47	0.32	67(100%)	-	-	-	-
	R										
12h	T	107(160%)	15.2	13.0	0.47	0.28	135.6(202%)	19.4	20.0	0.44	0.29
	R	3284.6	50.0	22.4	0.60	0.33	2457.0	49.3	27.0	0.44	0.24
24h	T	104.8(156%)	13.2	21.6	0.44	0.29	156.0(233%)	16.4	13.0	0.41	0.26
	R	3648.0	40.4	19.2	0.64	0.23	4388.0	36.4	28.9	0.68	0.25
36h	T	106.2(159%)	23.0	10.0	0.48	0.26	153.6(229%)	18.2	15.2	0.39	0.25
	R	2825	49.8	28.2	0.80	0.29	2607.0	46.4	31.8	0.71	0.28
48h	T	128.4(192%)	14.4	15.2	0.36	0.27	156.8(234%)	18.8	17.0	0.36	0.28
	R	3918	50.4	35.4	0.42	0.26	3960.0	44.8	33.4	0.68	0.24

pH 4.0에서 50 me·L⁻¹ 를 처리한 구에서는 pH 3.0과는 달리 48시간 후 190 %, 100 me·L⁻¹에서도 230 %만 증가하였다 (Table 2-54). 이와 같은 결과는 Koichi와 Yuki (1996)가 잎과, 싹갓, 시금치를 이용하여 엽내 Fe 함량을 높이는 실험을 한 결과에서 싹갓은 Fe 함량이 증가되어 과잉증이 나타났고, 시금치와 잎과는 엽내 흡수율도 증가하였고 Fe 과잉증도 나타나지 않았다고 하여 본 실험과 유사한 결과를 나타냈다. 또한 小口裕(1996)은 토양에서 시금치 품종별 Fe 함량을 증가시키는 실험에서 엽신, 엽병의 Fe 함량이 증가되었고 또한 식물체 내의 Fe 함유량은 품종간, 계절에 의해 변화가능성이 많다고 보고하였다. 본 실험에서도 엔디브외에 다른 엽채류작물로 Fe-EDTA를 사용하여 실험하였지만 명확한 결과를 얻지 못하였다. 단지 엔디브에서 흡수율이 증가하는 경향이 나타났기 때문에 AFC와 Fe-EDTA를 사용하여 엔디브의 Fe 흡수량 실험을 수행하였다.

처리 별로 식물체를 분석하여 철과 인산의 영향을 보았다 (Table 2-53과 2-54). P/Fe 비를 계산해보면 pH 4.0, 50 me·L⁻¹에서는 70~28로 감소되고 pH 4.0, 100

me·L⁻¹은 70~23, pH 3.0, 50 me·L⁻¹은 70~6.3, pH 3.0, 100 me·L⁻¹은 70~17.3으로 감소하였다. 그 중 철함량이 가장 높았던 pH 3.0, 50 me·L⁻¹에서 P/Fe 비가 가장 낮았다. P/Fe 비는 세포 안에서 Fe³⁺과 Fe²⁺의 평균의 척도이며 P/Fe 비가 높은 것은 Fe³⁺ 쪽으로의 전환을 뜻하며 Fe³⁺이 인단백에 결합될 수 있음을 나타내는 것이다. 즉, 인산농도가 증가하면 식물체가 가용성이나 이동성 형태의 철을 흡수하거나 붙잡는 능력이 줄어들고 식물체내에서도 인산과 결합된 철은 이동성이 없어 결국 백화현상을 일으킨다고 알려져 있다.

pH별로 철의 흡수량을 본 실험의 결과는 대조구 (control)에 비해 약 9배나 높은 수치였고 모든 처리에서 잎에 철과잉증은 나타나지 않았다. 하지만 식물체내 철의 함량을 높이는 방법으로 식물체마다 특성이 있으므로 모두 이런 방법을 사용할 수는 없다.

이상과 같은 결과를 종합하여 보면 엽채류의 수확직전에 담액방식을 이용하여 근권내 고농도 (50, 100 me·L⁻¹)의 철 (ammonium ferric citrate)을 처리하여 엽내 철이 강화된 식물을 생산할 수 있었다.

앞으로 기능성 채소로서 개발하기 위하여 기능성 인자의 체내작용 기작이 생화학적, 생리학적으로 밝혀져 있어야 하며 섭취 후에 기대되는 기능이 실제로 발현되는지에 대한 연구가 수행되어야 하겠다.

바. 식물공장 유형별 상추 생육 및 품질

기존 관행 비닐하우스내 수정재배와 식물공장 유형을 완전제어형과 인공광 베티용형으로 하여 상추를 재배하였을 때 4품종의 상추 생육은 모두 완전제어형 식물공장에서 가장 좋은 생육을 나타냈고, 비닐하우스에서 낮은 생육을 나타냈다. 그러나 적상추 계통의 3품종(Bijou, Estafet, Cerize)는 그 색상이 뚜렷하게 나타나 품질이 가장 우수하였던 처리는 플라스틱하우스에서였다. 다음으로 완전제어형 식물공장에서 안토시아닌 함량이 높게 나타났다. 이것은 근본적으로 안토시아닌 색상이 파장의 영향을 받기 때문으로 베티온실에서는 자외선의 많은 부분이 차단되었던데 기인하는 것으로 보였다.

Table 2-55. Growth and quality response of leaf lettuce cultivars in different plant factories and plastic house.

재배시스템	Cultivar	No. of leaves	Leaf length	Leaf width	Fresh weight (g · plant ⁻¹)		Dry weight (g · plant ⁻¹)		Anthocyanin ^Z
					Leaf	Root	Leaf	Root	
Plastic house	Bijou	17	20.8	15.0	67.44	10.94	3.42	0.87	+++++
	Lobi	15	12.1	14.7	37.89	12.16	1.68	0.94	-
	Estafet	15	17.0	17.1	77.83	13.87	3.95	0.99	+++++
	Cerize	27	19.9	14.4	78.52	18.92	3.71	1.30	+++++
	Mean	19	17.5	15.3	65.42	13.97	3.19	1.03	
태양광 이용형	Bijou	18	20.1	16.5	78.08	13.58	4.09	0.86	++
	Lobi	16	17.1	16.7	75.41	21.75	3.65	1.61	-
	Estafet	22	17.1	16.1	108.77	13.50	4.46	0.89	++
	Cerize	26	22.3	15.5	86.07	19.51	3.97	1.27	++
	Mean	21	19.2	16.2	87.08	17.09	4.04	1.16	
완전 제어형	Bijou	17	21.3	17.8	97.54	9.84	4.02	0.72	++++
	Lobi	15	18.1	16.7	82.50	14.77	3.13	1.00	-
	Estafet	15	14.9	15.0	116.60	14.90	4.14	0.88	++++
	Cerize	27	23.6	15.4	96.47	13.14	3.05	0.80	++++
	Mean	19	19.5	16.2	98.27	13.16	3.59	0.85	

또한 광 조건이 다른 완전 제어형 식물공장, 인공광 병용형의 식물공장과 자연 광만에 의존하는 양지붕형 온실 조건에서 생육 단계에 따라 상추의 생체중을 조사한 결과는 다음과 같다(Fig. 2-34).

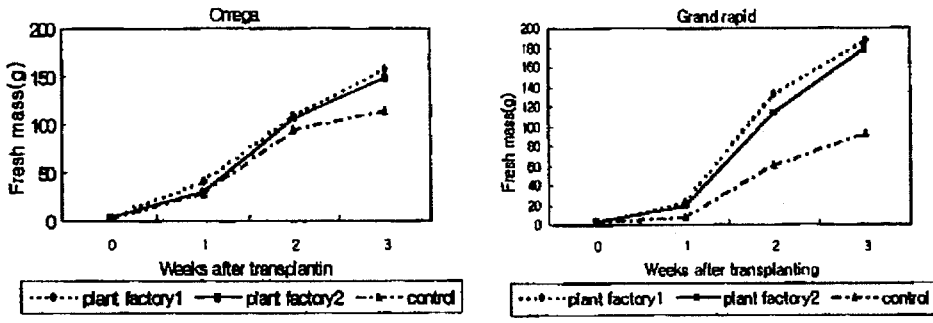


Fig 2-34. Growth pattern of lettuce according to the plant factory type after transplanting.

또한 인공광 병용형의 이동식 식물공장과 같이 상추의 생육단계에 따른 배양액 농도를 초기, 중기, 후기로 나누어서 다르게 하였을 때의 성장 특성을 규명하기 위해서 생체중과 잎면적을 Fig 2-35에 나타내었다.

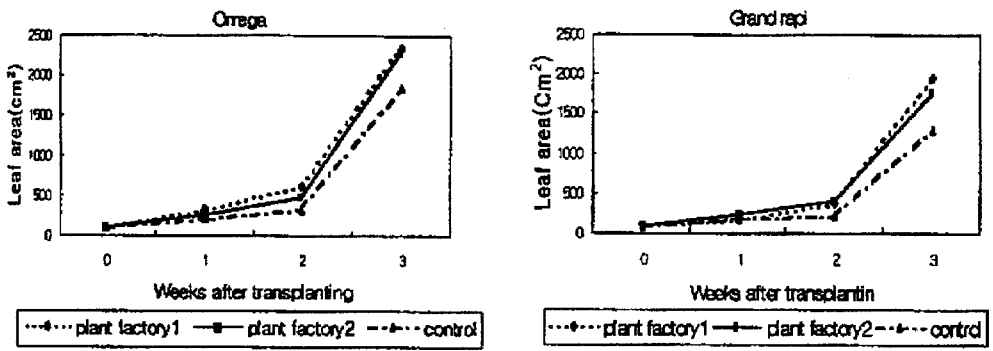


Fig 2-35. Growth pattern of lettuce according to the after transplanting.

그 결과 오메가와 그랜드래피드 모두 3주째에 생체중과 잎면적이 완전제어형과 인공광 병용형 식물공장에서 높았으며, shoot와 root의 건물중 또한 같은 양상을 보였다(No data). 완전제어형과 인공광 병용형 사이간에는 유의차가 없었으나, 일반 관행재배구인 양지붕형에서는 상대적으로 낮은 수치를 나타냈다.

Table 2-56. The growth of lettuce at 21days after transplanting according to the plant factory type.

Treatment	Fresh mass Shoot/Root	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Leaf area (cm ²)	chlorophyll (SPAD)
Butterhead lettuce 'Omega'						
Plant ^z factory1	157.2/13.84	20.0	19.7	43.3	2339.7	21.92a ^w
Plant ^y factory2	148.3/12.73	19.1	19.7	40.7	2298.6	22.36a
Control ^x	114.3/12.1	19.3	19.2	37.7	1839.2	24.56a
Leaf lettuce 'Grand Rapids'						
Plant factory1	187.4/17.85	21.9	20.8	27.3	1965.3	19.58a
Plant factory2	172.1/14.03	20.6	18.8	25.7	1777.3	15.24a
Control	93.1/11.89	20.2	17.3	16.7	1308.5	18.24a

^zClosed plant factory with artificial lighting.

^yPlant factory with natural and artificial lighting.

^xEven span green house.

^wMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

Table 2-56에서 엽장이나 엽폭은 세처리구에서 별다른 차이가 없었고, 엽수는 완전제어형, 인공광 병용형, 양지붕형의 순으로 높았다. 엽록소 함량은 오메가 같은 경우에 1~2주 동안은 완전제어형의 함량이 높게 나타났으나 3주째에는 유의적인 차이가 없었고, 그랜드래피드는 1~3주 동안 유의적인 차이가 없었다.

Table 2-57는 세 처리구에서 생육단계별로의 광합성, 기공저항 및 증산량을 나타내었다. 광합성과 증산량은 인공광 병용형과 양지붕형이 완전제어형보다 높게 나타났고, 기공저항은 완전제어형에서 높았다.

Table 2-57. Comparisons of lettuce growth according to the plant factory type after transplanting.

Treatment	Photosynthesis ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			Stomatal resistance (s cm^{-1})			Transpiration rate ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
	7day	14day	21day	7day	14day	21day	7day	14day	21day
Plant ^z factory1	7.51 a ^w	7.65 c	6.22 b	1.062 a	1.157 a	0.637 a	8.82 b	7.68 c	7.25 b
plant ^y factory2	12.83 a	14.72 a	11.35 a	0.343 b	0.631 c	0.451 b	23.52 a	16.74 a	10.37 a
Control ^x	12.69 a	12.77 b	7.16 b	0.389 b	0.865 b	0.651 a	22.61 a	11.66 b	9.81 a
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Plant factory1	3.69 c	3.53 b	3.26 c	1.612 a	1.554 a	0.809 a	5.42 b	11.79 a	7.58 b
plant factory2	6.99 b	6.74 a	9.75 a	0.345 c	0.686 b	0.267 c	20.49 a	13.03 a	11.72 a
Control	9.74 a	7.03 a	7.65 b	0.661 b	0.746 b	0.455 b	19.57 a	10.77 a	11.00 a

^zClosed plant factory with artificial lighting.

Light intensity : 280-300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PPFD, Leaf temperature : 22 \pm 1.

^yPlant factory with natural and artificial lighting.

Light intensity : 900-1200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PPFD, Leaf temperature : 20-23.

^xEven span green house.

Light intensity : 900-1200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PPFD, Leaf temperature : 20-25.

^wMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

또한 반결구 상추를 이용해 식물공장 및 NFT, 토양 재배를 하여 비교실험을 실시한 결과 다음 Fig 2-36과 같이 식물공장 NFT, 토양 재배순으로 생체중이 높게 측정되었다.

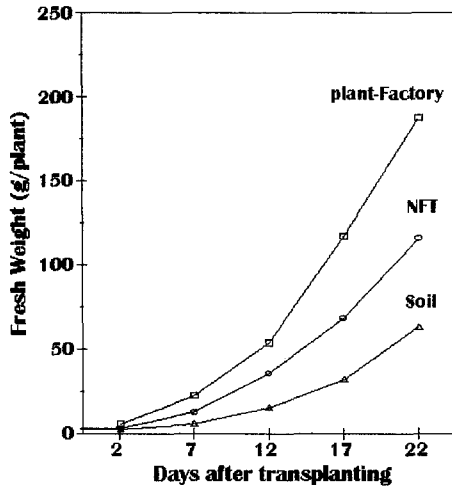


Fig 2-36. Changes in fresh weight of butterhead lettuce grown in NFT and plant factory.

사. 완전제어형 식물공장 인공광원에 따른 상추의 생육 및 품질

인공광원에 따른 결구상추 생육은 정식 17일에서 엽수, 엽면적, 지상부 생체중과 지상부 건물중의 유의적인 차이는 없었으며, 최대 엽장과 최대엽폭은 메탈할라이드등에서 다른 광원보다 높게 나타났다.

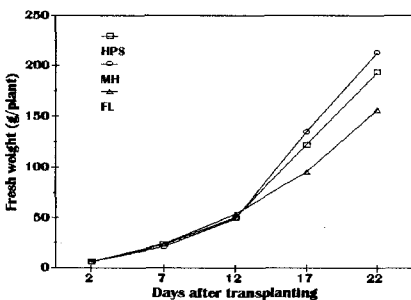


Fig 2-37. Changes in fresh weight of butterhead lettuce grown in plant factory with different light source.

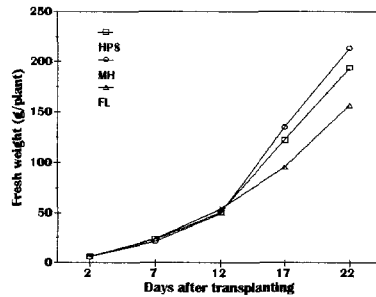


Fig 2-38. Changes in fresh weight of crisphead lettuce grown in plant factory with different light source.

고압나트륨등에서 엽장과 엽폭의 길이가 비슷하였지만, 메탈할라이드등과 형광등은 엽폭의 길이가 엽장의 길이보다 더 길었다. 전반적인 생육은 형광등에서 가장 낮게 나타났다. 식물공장에 이용할 수 있는 인공광원으로는 고압나트륨등, 메탈할라이드등과 형광등이 좋지만, 메탈할라이드등은 램프의 수명이 짧은 단점이 있으며, 형광등은 광원수가 많이 투여되고, 광원 교체할 때 많은 노동력이 투여된다는 단점이 있다. 그리고 인공광원의 효율은 고압나트륨등, 메탈할라이드등, 형광등 순으로 높기 때문에 고압나트륨등을 사용하는 것이 경제성 면에서 좋다고 생각된다. 또한 고압나트륨등은 식물광원에 유용한 파장을 내는 HID(high intensity discharge)램프보다도 효율성이 더 크다는 보고도 있다. 잎끝마름증 발생율은 모든 초리구에서 발생하였는데, 정식 후 14일에 처음으로 발생하였으며, 자엽으로부터 9~10번째 잎에서 처음 증상이 관찰되었다. 광원간에는 메탈할라이드등에서 가장 높게 나타났다(Table 2-58).

Table 2-58. Effect of article light source on growth of cripshead lettuce at 17 days after trasplanting.

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

^zHPS: high-pressure sodium lamp, MH: metal halide lamp, FL: fluorent lamp

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

Daniel과 Tibbitts(1991)는 제어된 환경하에서 생육한 결구상추의 잎끝마름증은 보통 자엽으로부터 8번째 잎에서 처음 발생한다고 하였다. 본 실험은 거의 유사한 엽위에서 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(Table 2-59)

Table 2-59. Effect of article light source on CO₂ assimilation of crisphead lettuce at 21days after trasplanting.

Light Source ^z	Leaf	Photosynthesis	Stomatal	CO ₂ assimilation rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
	Temperature (°C)	photon flux density ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	resistance (s · cm-1)	
HPS	25.8	227	0.678	6.61
MH	23.8	187	0.849	5.67
FL	23.9	177	0.729	5.64

^zHPS: high-pressure sodium lamp, MH: metal halide lamp, FL: fluorent lamp

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

인공광원에 따른 작물생장율(crop growth rate)과 엽면적지수(leaf area index)간의 관계를 보면, 세 처리구의 순동화율이 초기에 빠른 생육을 보였다. 정식 후 17일까지 상추의 빠른 성장율을 볼 수 있는데, 이러한 빠른 성장율로 인해 잎끝마름증과 관련이 있다고 생각되어진다. 즉 작물의 성장속도에 비해 칼슘의 흡수이동속도가 따라가지 못하여 나타난 현상으로 파악된다.

여러 보고서에 의하면, 잎끝마름증은 식물 성장율과 관련이 있다라고 하는데, 그 이유는 칼슘에 대한 식물의 흡수와 분배가 일치하지 않는 쪽으로 증가하였기 때문이라고 한다.

정식 후 34일에 인공광원에 따른 엽내 무기성분은 정상적인 함량보다 인, 칼슘과 마그네슘 함량이 낮게 나타났으며, 철, 구리와 망간 함량이 높게 나타났다. 다른 성분들은 정상적인 함량을 보였다.

Table 2-68. Effect of article light source on the nutrient content of crisphead lettuce at 34days after trasplanting.

Light Source ^z	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	161.5
MH	4.70	0.53	9.53	0.62	0.22	154	15.2	250	78.5
FL	5.37	0.50	8.61	0.71	0.24	153	16.8	304	70.9

^zHPS: high-pressure sodium lamp, MH: metal halide lamp, FL: fluorent lamp

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

Maruo 등(1991)은 태양광 이용형 식물공장에서 반결구 상추에 대한 고압나트륨 등과 메탈할라이드등의 혼합 보광은 엽내 T-N와 K의 흡수 증가를 유도한 반면, P와 Ca의 흡수 감소가 나타난다고 하였으며, 반면에 Tremblay등(1984)은 겸용방식의 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, 세처리구의 전질소와 인은 정식 초기와 수확 후기의 함량변화가 없었다. 그러나 칼슘과 마그네슘은 축적되는 경향을 보였으며, 칼륨은 계속해서 감소되는 경향을 보였다(Fig. 2-39). 정식 후 12일 후부터 상추의 칼륨 흡수가 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 칼슘과 칼슘간의 길항작용이 상추의 잎끝마름증 발생의 한 요인이라고 하였다. 미량원소의 변화를 살펴보면, 세처리구의 철과 망간은 정식 초기와 수확 후기의 함량변화는 없었다. 그러나 구리와 아연의 함량이 축적되는 경향을 보였다. 인공광원에 따른 배양액내의 다량원소와 미량원소의 흡수 패턴간에는 별다른 차이를 보이지 않았다.

이상의 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. 그러나 식물공장에서 상추의 상품가치를 크게 좌우하는 잎끝마름증 발생에 대한 원인에 대해 계속적으로 연구가 필요하였다.

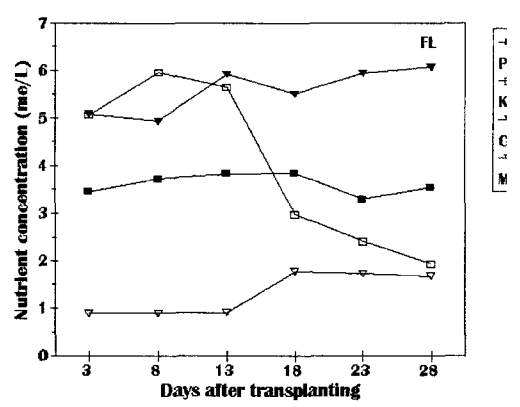
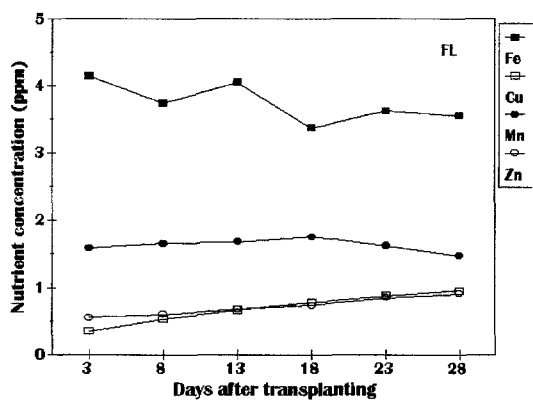
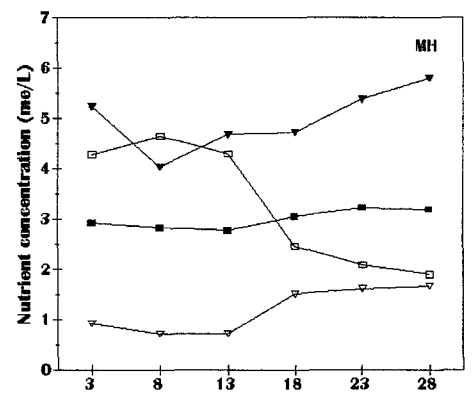
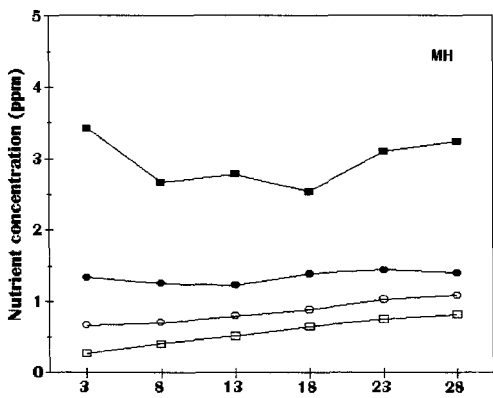
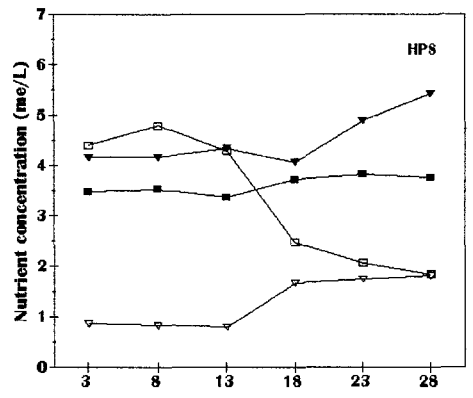
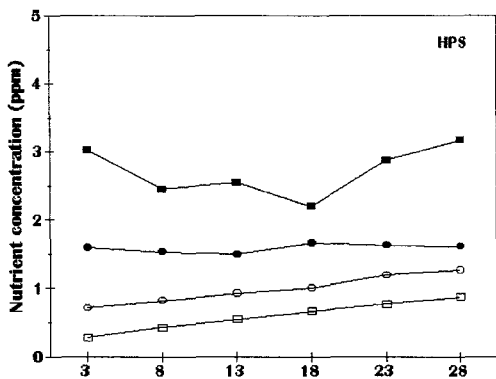


Fig. 2-39. Changes in macronutrient and micronutrient contents in nutrient solution of plant factory with three light source.

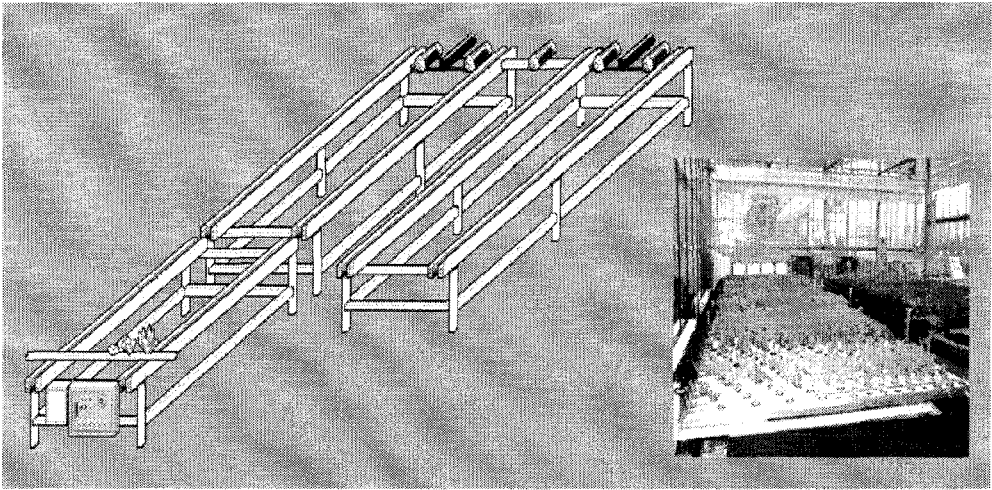


Fig. 2-42. An overall view of plant factory in University of Seoul.

Table 2-69. Productivity of lettuce in plant factory and hydroponic system of greenhouse.

System	Lettuce	Fresh weight (g · plant ⁻¹)	Marketable Yield (kg · m ⁻² · yr ⁻¹)	Plant density
Hydroponics in greenhouse	Leaf	120 ~ 140	30 ~ 40	20 × 20cm
	Butterhead	100 ~ 110	20 ~ 30	
Plant Factory	Leaf	160 ~ 200	60 ~ 80	Automatic spacing
	Butterhead	140 ~ 160	50 ~ 70	

Leaf Lettuce: 'Grand rapids'

Butterhead Lettuce: 'Omega'

태양광 병용형 식물공장에서 다양한 양액재배 시스템에 따른 경제성과 생산성, 품질 및 이동 효율성등을 종합적으로 검토한 결과 NFT가 가장 우수하여 이 시스템을 채용하여 상추류를 계획생산 할 때 계절에 따라 차이는 있으나 일반적으로 정식 후 20-25일 만에 수확이 가능하고, 연간14~18회 수확이 가능하여 50-70kg · m²을 생산할 수 있다는 것을 보여 주었다(Table 2-69). 또한 식물공장내에서 자동화 및 장치화에 따라 작업인력이 기존 수경재배 온실에 비해 1/5수준으로 낮출 수 있다.

3. 적요

가. 미나리 주년 생산을 위한 적정 수경재배 시스템 개발

일반적으로 미나리는 향신채소로서 우리나라의 경우 국민 건강에 지대한 영향을 미치는 광물질 공급원의 하나이다. 기존의 열악한 작업환경과 재배지의 오염으로 인한 미나리의 품질 저하를 고려하여 주년 내내 청정하고 품질이 높은 미나리를 생산하기 위해서는 시설을 이용한 주년생산이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 식물공장에서 미나리의 최적 생육 조건을 구명하기 위한 기초 시험으로 deep-flow system에서 뿌리와 접하는 양액의 수위를 3 및 7cm로 조절하고 mist-spray에서 뿌리가 위치하는 베드의 깊이를 각각 40과 80cm로 조절하여 미나리 생육에 가장 적합한 근권부 환경을 밝히고자 수행되었다.

각 재배방법에 따른 양액의 EC는 80cm mist-spray 처리구를 제외한 나머지 처리구에서 일정하게 유지되었으며, pH는 담액수경보다는 분무수경에서 변화의 폭이 적었다. 그리고 평균적인 일중 근권부 온도는 대체로 분무수경에서 큰 폭으로 증감하였으며 특히 용적이 큰 80cm mist-spray 처리구에서 고온으로 인해 뿌리 발육이 저조하였다. 반면에 담액재배에서는 대체로 완만한 변화를 보였다.

한편 미나리 품질은 가식부위인 지상부의 생육에 따라 결정되는데 주로 근권부의 온도에 따라 큰 차이를 보였고 재배방식에 따라 발육보다는 생장에 크게 영향하였다. 미나리 수확시의 지상부 및 지하부 생체중은 40cm mist-spray 처리구에서 가장 높았고, 80cm mist-spray 처리구에서 가장 저조한 생육을 보였다. 또한 지상부 및 지하부 건물중, 주근장 및 뿌리의 부피도 이와 유사한 경향을 보였으며, 이는 근권부 생육에 따라 지상부 생육에 크게 영향함을 알 수 있다.

생육 초반부의 광합성 효율은 생육이 저조한 3cm deep-flow, 80cm mist-spray 처리구에서 가장 높게 나타났으나 조도와 엽온을 일정하게 유지하여 준 생육 후반기에는 유의적인 차이가 인정되지 않았다. 기공 전도도도 광합성 효율과 유사한 경향을 보였다.

나. 공장생산을 통한 품질향상 체계 연구

수확시에 질산태질소 함량을 낮추고 ascorbic acid 함량을 높이기 위해 정식 후 12일 간격으로 생육에 적합한 양액농도를 구명하고 또한 질산태질소와 ascorbic acid 함량 변화를 알아보기 위해 수행한 실험 결과에서 생육전기와 후기 모두 양액농도가 높을수록 생육이 우수하였고, 생육후기보다는 전기에, 그리고 수분함량이 적고 건물생산량이 많으면 상대성장률도 높았다. 양액농도가 낮은 구에서 체내 무기함량도 낮았으며, 질산태질소는 3,600~3,800ppm으로 높았다. 생육초기에 양액농도를 낮게 한 후 중기부터 농도를 높여 재배한 경우 생육은 중반까지 대조구와 유사하였으나 수확기에 아마자끼 처방액으로 계속 재배한 구에서 약간 우수하였다. 총 및 산화형 ascorbic acid 함량은 생육 초기에 감소하다 중기에 약간 증가하고 후기엔 감소하는 경향을 보였으며, 아마자끼 처방액에서 높게 나타났다. 상추 부위별 함량에서는 새로 발생하는 안쪽의 잎에서 ascorbic acid 함량이 높았고, 질산태질소도 1,000ppm 가까이 낮아서 성숙엽보다 적당히 전개한 잎을 수확하는 것이 품질을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

상추의 수확시 다루기 좋고 품질을 높이기 위하여 단계별 단근과 수확 3일전 양액조정을 통한 체내 질산태질소 함량과 ascorbic acid 함량 변화를 보면 단근에 따른 상추생육은 초기에 영향이 없었으나 18일째 차이가 크게 나타나 대조구보다 감소하였다. 단근 정도에 따라서도 양수분 흡수량상이 다르게 나타났으며, ascorbic acid 함량은 중기에 가장 높았으나 처리간 차이는 없었고 후기에 산화형 ascorbic acid 함량비가 단근시에 높았으며 양액변경구에서 높았다. 반면 질산태질소는 생육에 따라 꾸준히 증가하였고, 단근처리에 양액변경구에서 가장 낮게 나타났다. 수확전 3일간 질산태질소를 제거한 양액에 sodium L-ascorbate 500ppm 처리와 단근에 따른 생육은 모두 대조구보다 감소하였고 총 ascorbic acid 함량은 양액조정구에서 가장 높았으며 질산태질소 함량도 상당히 감소하였다. 그러나 ascorbate 침지에 따라 뿌리가 길변하고 이취가 나기 때문에 유통과 품질에 문제가 있을 것으로 생각된다.

품질이 높은 상추를 생산하기 위해 수확 3일전 양액의 질산태질소 제거와 sodium L-ascorbate(NaAs)의 엽면시비가 상추의 품질에 미치는 영향을 알아보기 위해 수행한 결과 엽면살포 시기에 따라 생육은 유의적인 차이가 없어 흡수에 광의 영향이 없을 것으로 생각된다. 수확전 3일간 양액조정과 엽면시비의 효과를 살펴보면 생육은 증류수+1,500ppm 엽면살포구와 무처리 양액+3,000ppm 살포시 열악하였고, 체내 함량은 높은 양상을 보였다. 그러나 질산태질소는 대조구에서 가장 높고 조정구에서 가장 낮아 양액을 조정하면서 엽면살포를 하는 방법이 품질을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

질소 수준별 체내 ascorbic acid 함량은 유의적인 변화가 없던 반면 질산태질소는 암모니아태질소를 소량 혼용한 대조구에서 낮게 나타나 양액내 존재하는 질산태질소를 최대한 줄여야 할 필요가 있다고 생각된다.

처리시기별 영향은 나타나지 않아 광합성과 ascorbic acid의 흡수율에는 상관성이 없는 것으로 보이며, 광에 의한 ascorbic acid의 파괴도 일어나지 않은 것으로 생각된다. 또한 처리 농도별로 체내 함량이 증가하여 10,000ppm에서 가장 높아 대조구의 3.5배 높일 수 있었고, 저농도의 살포로도 체내 함량을 크게 높일 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 흡수된 ascorbic acid는 다른 부위로 쉽게 이동될 수 있음을 시사하였다.

다. 식물공장 엽채류 질산염(NO_3)함량 저하 기술

1) 상추 및 미나리 질산염(NO_3)함량 저하 기술

양액의 질소 형태에 따른 상추와 미나리의 생체중은 대조구에서 여타의 처리에 비하여 무거웠던 반면, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에서 가벼웠다. 그러나 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 에서의 생육이 NH_4NO_3 를 공급한 경우에 비하여 좋게 나타나 새로운 질소원으로서의 이용이 가능시 되었다.

$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 를 질소원으로 이용하고 양액의 pH를 3일에 1회씩 조절할 경우 상추와 미나리의 생육은 기존의 재배방법에 비하여 20% 정도 저하되었다. 그러나

식물체내 NO_3^- 함량은 1/10 수준인 $500\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW로 감소시킬 수 있었다. 아미노산의 총량은 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에서 $8\text{-}9\text{nM} \cdot \text{g}^{-1}$ FW 범위로 타 처리에 비하여 많았고, 대조구에서는 $1\text{-}2\text{nM} \cdot \text{g}^{-1}$ FW 범위로 매우 적었다. 가용성 단백질의 함량은 대조구, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, NH_4NO_3 및 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 의 순으로 많았는데, 대조구에서는 $4\text{-}5\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에서는 $1\text{-}2\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 범위를 각각 나타내었다. Alcohol insoluble solid, pectin, hemicellulose 및 cellulosedml 함유 비율은 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 에서 여타의 질소원에 비하여 높았고, 대조구와 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 에서 낮았다.

2) 배양액의 $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ 의 비율이 바실의 생육 및 질산염(NO_3^-)함량에 미치는 영향

배양액내 질소원의 비율이 근권변화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시립대 배양액 (SCU)을 기준양액으로 $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ 의 비율을 100:0, 85:15, 70:30, 50:50 및 30:70으로 조성하여 NFT 방식으로 재배하였다. 근권내 pH는 NO_3^- 를 단독으로 처리한 100:0 처리구에서는 시간이 경과함에 따라 계속 상승하였던 반면, NO_3^- 와 NH_4^+ 의 혼용구에서는 NH_4^+ 비율이 높을수록 pH가 더 낮아지는 경향을 보였다. 본 실험에서 근권내 pH, EC 및 무기성분 농도의 변화가 적어 배양액 관리가 용이하고, 체내 질산염 수준이 낮으며 생육과 수량이 높은 배양액의 질소원 비율, $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ 가 85:15에서 가장 적합할 것으로 판단되었다.

라. 식물공장에서 엽채류 품질(tipburn) 제어

완전제어형 식물공장에서 주/야 기온을 달리했을 때 반결구 상추와 잎상추의 광합성은 처리 25일까지 주/야 기온이 상승함에 따라 증가하여 30/25℃에서 가장 높았다. 그러나 처리 35일째 두 품종 상추의 광합성은 20/15℃에서 높았으며, 생육은 30/25℃에서 가장 높았다. 잎끝마름 발생은 성장속도가 빠른 30/25℃에서 생육 중기 결구가 형성됨에 따라 반결구 상추에서만 발생하였으나 생육 후기는 20/15℃에서 반결구 상추는 100%, 잎상추는 50% 발생하였다.

완전제어형 식물공장에서 25일동안 주/야 습도 환경을 달리 하였을때 반결구 상추의 광합성은 야간 습도와 관계없이 주간 80% 처리에서, 잎상추는 80/40% 처리에서 높았다. 증산률은 두 품종 모두 주간 40% 처리에서 낮았으며, 80/80% 처리의 반결구 상추는 높은 광합성에도 불구하고 가장 낮은 증산률을 나타내 잎끝마름이 100% 발생하였다. 두 품종 상추의 생육은 80/80% 처리에서 가장 높았고, 상대 성장률이 빨랐으나 잎상추는 습도 처리에 의한 잎끝마름이 발생하지 않았다. 상추 내부부의 칼슘 함량은 야간 다습 처리에서 높았으며, K/Ca 함량비가 높은 반결구 상추는 40/80% 처리를 제외한 모든 처리에서 잎끝마름이 발생하였다.

인공광 병용형 벤로온실에서 근권 배양액의 pH를 달리하여 25일동안 처리한 반결구 상추와 잎상추의 광합성은 pH 6.0에서 가장 높았으며, 엽록소 함량은 pH 4.5에서 높았다. pH 처리에 따른 반결구 상추의 생육과 상대성장률은 처리간 큰 차이가 없었으나 잎상추는 pH 4.5에서 낮은 성장률로 생육 저하와 함께 잎끝마름이 발생하였다. 용존산소 농도를 달리하여 15일 처리한 후 반결구 상추와 잎상추의 증산률과 근활력은 용존산소 농도 7~8mg L⁻¹ 처리에서 가장 높았다. 7~8mg L⁻¹ 용존산소 처리에서 두 품종 상추의 생육은 2~3mg L⁻¹ 처리에 비해 반결구 상추는 2.6배, 잎상추는 1.5배 높았다.

인공광 병용형 벤로온실에서 반결구 상추의 glutathione reductase 활성은 결구가 형성되면서 잎끝마름이 발생한 4.5 dS m⁻¹와 9.0 dS m⁻¹에서 급격한 증가를 보였다. EC 처리 1일째 4.5 dS m⁻¹와 9.0 dS m⁻¹에서 두 품종 상추의 근활력은 1.5 dS m⁻¹ 보다 높았으나, 처리 3일째는 감소한 후 처리 시간이 경과함에 따라 증가하여 높은 염 농도에 적응하였다. 9.0 dS m⁻¹에서 두 품종 상추의 이온 유출과 엽록소 함량은 1.5 dS m⁻¹에서 보다 2배 이상 높았으며, 광합성은 감소하였다. 반결구 상추 4.5 dS m⁻¹와 9.0 dS m⁻¹에서는 잎끝마름 발생률이 높았으나 잎상추는 처리에 따른 생육 차이도 없었으며, 잎끝마름도 발생하지 않았다. NaCl로 조절된 배양액의 EC 증가는 반결구 상추의 수분 흡수 감소와 생육 억제를 가져왔으며, 염 내 나트륨 함량의 증가는 칼슘 함량이 감소하였고, K/Ca비, Mg/Ca비가 증가하였다.

인공광 병용형 벤로 온실에서 재배한 반결구 상추의 시간에 따른 ⁴⁵Ca 축적은

24시간에 최대를 이루었으며, 칼슘 이동은 정단부로 우선 진행함에 따라 정단부 방사능 칼슘 축적능은 25~26엽위에 비해 4.4배 높았다. 1.5 dS m⁻¹ 처리의 반결구 상추 ⁴⁵Ca 이동이 가장 활발히 진행되었고, 9.0 dS m⁻¹의 반결구 상추는 정단부로부터 5위엽까지 미약하나마 ⁴⁵Ca 이동이 진행되었다. EC에 따른 반결구 상추 정단부 ⁴⁵Ca의 방사능 축적능은 1.5 dS m⁻¹가 13.5 dS m⁻¹에 비해 3배 이상 높았다.

이상의 결과를 종합해 볼때 식물공장에서 품질저하를 나타내는 상추의 잎끝마름은 결구가 형성되는 반결구 상추에서 발생률이 높아 종간의 형태적 특성이 제한인자로 작용하였다. 고품질 생산을 위한 상추 재배에서 지상부 환경은 생육 초기에 22~26℃, 70~80%의 고온, 다습 조건에서 빠른 생육을 유도한 후, 생육 후기에 20~24℃, 50~60%를 유지하며, 근권 환경은 pH 5.5~6.0, EC 1.5~2.0 dS m⁻¹, 배양액의 Ca, K, Mg, NH₄ 함량은 3.0~3.5me L⁻¹, 6.0~6.5me L⁻¹, 2.0~2.3me L⁻¹, 1.0me L⁻¹으로 조절하는 것이 높은 생육과 잎끝마름 발생을 줄일 수 있을 것으로 판단되었다.

마. 철함량이 높은 기능성 엔디브 생산기술개발

기능성성분 (Fe)이 다량 함유한 작물을 재배하기 위하여 성분육종의 기초적인 단계로 엽내 철이 강화된 엽채류 (엔디브)를 생산하고자 하였다. 수확직 전에 배양액내 철 공급원으로 ammonium ferric citrate를 이용하여 pH 3.0에서 48시간 처리 후 대조구보다 9배가 증가된 엔디브를 생산하였다.

이 방법은 모든 엽채류에 적용될 수 없으며 각 작물의 특성을 고려한 방법들을 개발하기 위하여 더 많은 연구가 앞으로 이루어져야겠다.

바. 식물공장 유형별 상추 생육 및 품질

식물공장 형태에 따른 상추의 생육을 조사한 결과 전체적으로 토양이나 플라스틱 온실, 양지붕형 온실보다는 완전제어형 식물공장과 태양광 이용형 식물공장에서의 상추 생육이 좋았다. 완전제어형 식물공장은 태양광 이용형 식물공장보다 생육이 좋거나 비슷한 것으로 나타났다.

적축면 상추의 안토시아닌 색소 발현은 식물공장보다 플라스틱 온실에서 더 잘 나타는 것으로 조사되어 광조건 및 피복소재와의 상관성 연구가 더 요구되는 것으로 나타났다.

아. 완전제어형 식물공장 인공광원에 따른 상추의 생육 및 품질

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

자. 공장적 대량 생산 시스템

일반 시설재배 생산 시스템과 달리 식물공장은 생육속도, 재배환경, 재배방식 등이 분명히 다르다. 따라서 이에 맞추어 상추의 육묘에서 정식, 재배, 수확에 이르기까지 생육기간과 속도, 적절한 영양공급, 기상환경요인의 제어등이 필요하다. PLC에 의한 콘베이어 벨트 이동에 의한 재식밀도 제어를 통한 생육 조절, PLC에 의한 정량 펌프 제어를 통한 영양공급 제어로 적절한 무기영양 환경을 공급할 수

있다. 또한 시설의 습도, 온도, 광 등 기상환경을 제어함으로써 상추의 생육 최적 환경을 조성할 수 있다. 이로 인해 보다 고품질, 기능성, 대량생산 그리고 균일적인 공정 생산 기반이 가능한 것으로 나타났다.

제 3절 기능성, 고품질 채소 생산 첨단관리 기술 자동화 개발

1. 재료 및 방법

가. 일장 및 재배시기가 양액재배 미나리의 생육 및 품질에 미치는 영향

시설내에서 미나리의 주년적인 양액 재배법 확립에 필요한 기초 생육과 품질의 변화를 알아보려고 수행하였으며, 시험에 공시한 미나리는 보성 지방종을 전년도에 채종한 후 3개월 이상 노지에서 층적 처리하여 발아를 촉진시킨 종자로 정식시의 본엽은 평균 3매, 초장은 $6.2 \pm 0.3\text{cm}$ 이었다.

양액은 모든 처리 공히 서울대에서 개발한 미나리 전용양액(安과 李, 1991)이었으며 이의 조성은 대량원소로서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 16, $\text{NH}_4\text{-N}$ 3, P 3, K 4, Ca 2, Mg 1, $\text{SO}_4\text{-S}$ $1\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ 및 Fe 3ppm, 미량원소로서 B 0.5, Mn 0.5, Zn 0.5, Cu 0.02 및 Mo 0.01ppm이었다.

10일 간격으로 채취하여 생육을 조사하고 종료시 엽록소 및 ascorbic acid 함량을 조사하였으며, 양액은 10일 간격으로 갱신하였다. 일장처리를 위해 백열등(60W)을 1m 간격으로 설치하여 16시간 일장과 광중단(NI, 24:00~01:00)을 1시간 처리하였고, 대조구로 자연일장을 두었다. 계절별 일장효과를 알아보기 위해 매월 5일과 20일에 파종하여 재배하였다.

나. 적산일사량과 일수에 따른 상추와 미나리의 생육특성

1) 미나리 생육특성 구명

인공생육실내 온도를 $18 \sim 27^\circ\text{C}$ 로 유지하면서 수경재배하여 정식부터 수확시까지

지 생육변화를 알아보았다. 공급한 양액 조성은 K 6, Ca 2, Mg 1, 및 H_2PO_4 3me · L⁻¹의 1배액이었고, 3개의 bed에 bed당 94개체(47cell)씩 정식하고 50L를 공급하였다. 격일로 3cell씩 채취하여 생육 조사하였고, 기상조건은 data logger (CR10X, Compbell Sci. Inc., USA)를 이용하여 수집한 다음 분석에 이용하였다.

2) 상추 생육특성 구명

일사량은 기상조건에 영향을 받기 때문에 미나리와 약간 다르고 온도는 비슷한 조건에서 상추를 재배하여 생육의 특성을 알아보았다. Bed당 29개체씩 6개 bed에 정식한 다음 10일째와 19일째에 각각 6 및 5개체를 수확내고, 격일로 총 3개체씩 채취하여 생육을 조사하였다. 양액조성은 Yamazaki액으로 K 4, Ca 2, H_2PO_4 1.5 및 Mg 1me · L⁻¹ 1배액이었고 bed당 50L씩 공급하였다.

다. 생육단계에 따른 미나리와 상추의 양수분 흡수 특성과 생육

상기 실험에서 밝혀진 생육특성(생육전기, 생육후기)에 따라 미나리와 상추의 양수분흡수 특성을 밝히고 여러 가지 양액조성으로 재배하여 생육차이와 최적 조성을 구하고자 수행하였다.

상추 양액재배시 EC 조절은 불합리하고 미량원소까지 조절한 것과 N, P, K, Ca 및 Mg만 조절한 경우 생육 차가 없어 3~4개의 대량원소만으로 조절하는 것이 노력과 경비를 절감할 수 있다고 보고(Cho et. al., 1999)되었다. 따라서 Schrevens 등(1993)과 Rijck 등(1995, 1998)이 제시한 simple lattice design에 따라 격자배치하여 양액의 K, Ca 및 Mg의 각각의 비율(Fig. 2-42)대로 생육 전기와 후기로 나누어 조합하여 생육반응을 조사하였다. 여기서 제시한 양이온(K, Ca 및 Mg)의 비율은 각각 0.25~0.70, 0.25~0.70 및 0.05~0.30이었다. 각 원소별 비율과 농도는 미나리는 Table 2-71와 같고 상추는 Table 2-74와 같이 하여 세 원소 비율의 합이 1이 되도록 하였다.

Table 2-70. The proportions of 3 elements by simple lattice design in the simplex factor space for a 3-component mixture system

Elements	Extreme Vertice		Edge	Overall
	Low	High	Centroid	Centroid
K	0.25 ^z	0.70	0.475	0.47
Ca	0.25	0.70	0.475	0.40
Mg	0.05	0.30	0.175	0.13

^z Proportions of each element.

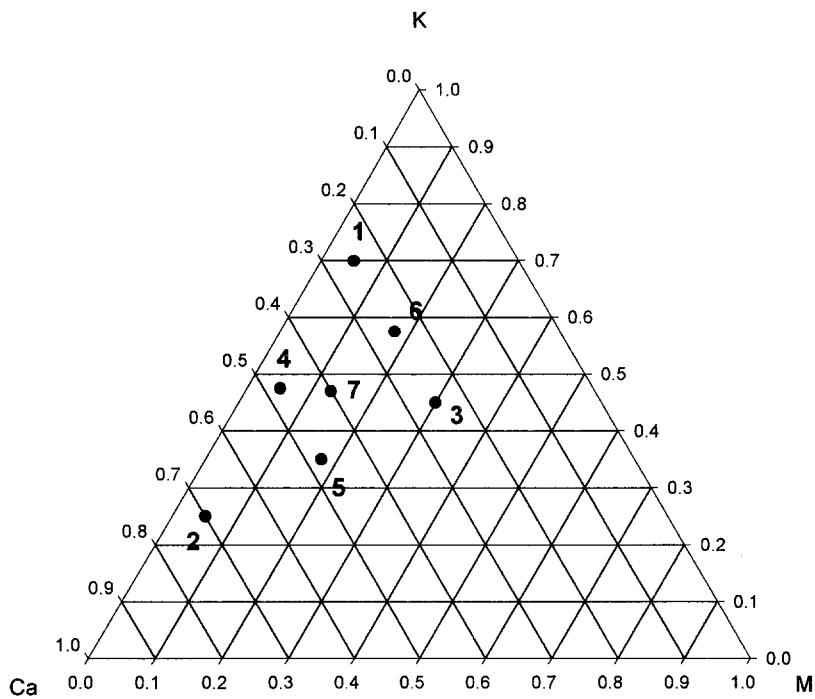


Fig. 2-42. The matrix of the design points. The dots and numbers represent solution number respectively.

1) 미나리 생육특성에 따른 양액흡수 변화

미나리 전후기 생육에 적합한 양액조성을 구하기 위해 Fig. 9의 각 점에 해당하는 비율에 총이온 농도가 생육전기에 $24.0\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ (양이온 농도 $12.0\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$), 생육후기에 $33.0\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ (양이온 농도 $16.5\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$)가 되도록 하였고 그 조성은 Table 2-71와 같다.

Table 2-71. Cation proportions and concentration for the 7 nutrient solutions of the 3-component design used for the water dropwort culture.

Constrained simplex	Solution no.	K			Ca			Mg		
		Prop.	I ^z <i>me · L⁻¹</i>	II <i>me · L⁻¹</i>	Prop.	I <i>me · L⁻¹</i>	II <i>me · L⁻¹</i>	Prop.	I <i>me · L⁻¹</i>	II <i>me · L⁻¹</i>
	1	0.7	6.3	9.45	0.25	2.25	3.375	0.05	0.45	0.675
Extreme	2	0.25	2.25	3.375	0.7	6.3	9.45	0.05	0.45	0.675
	3	0.45	4.05	6.075	0.25	2.25	3.375	0.3	2.7	4.05
	4	0.475	4.275	6.4125	0.475	4.275	6.4125	0.05	0.45	0.675
Edge	5	0.35	3.15	4.725	0.475	4.275	6.4125	0.175	1.575	2.3625
	6	0.575	5.175	7.7625	0.25	2.25	3.375	0.175	1.575	2.3625
Overall	7	0.47	4.23	6.345	0.4	3.6	5.4	0.13	1.17	1.755

^z I and II mean early stage and later stage, respectively. The nutrient solutions had a total ionic concentration of $24.0\text{ me} \cdot \text{L}^{-1}$ in early stage and $33.0\text{ me} \cdot \text{L}^{-1}$ in later stage.

2) 상추 생육특성에 따른 양액흡수 변화

상추 전후기 생육에 적합한 양액조성을 구하기 위해 Fig. 9의 각 점에 해당하는 비율에 총이온 농도가 생육전기에 $17.0\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ (양이온 농도 $8.5\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$), 생육후기에 $25.5\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ (양이온 농도 $12.75\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$)가 되도록 하였고 그 조성은 Table 2-72과 같다.

Table 2-72. Cation proportions and concentration for the 7 nutrient solution of the 3-component design used for the leaf lettuce culture.

Constrained simplex	Solution no.	K			Ca			Mg		
		Prop.	I ^z $me \cdot L^{-1}$	II $me \cdot L^{-1}$	Prop.	I $me \cdot L^{-1}$	II $me \cdot L^{-1}$	Prop.	I $me \cdot L^{-1}$	II $me \cdot L^{-1}$
Extreme	1	0.7	4.9	7.35	0.25	1.75	2.625	0.05	0.35	0.525
	2	0.25	1.75	2.625	0.7	4.9	7.35	0.05	0.35	0.525
	3	0.45	3.15	4.725	0.25	1.75	2.625	0.3	2.1	3.15
Edge	4	0.475	3.325	4.9875	0.475	3.325	4.9875	0.05	0.35	0.525
	5	0.35	2.45	3.675	0.475	3.325	4.9875	0.175	1.225	1.8375
	6	0.575	4.025	6.0375	0.25	1.75	2.625	0.175	1.225	1.8375
Overall	7	0.47	3.29	4.935	0.4	2.8	4.2	0.13	0.91	1.365

^z I and II mean early stage and later stage, respectively. The nutrient solutions had a total ionic concentration of $17.0 me \cdot L^{-1}$ in early stage and $25.5 me \cdot L^{-1}$ in later stage.

라. 적산 일사량에 따른 상추의 생육 모델링과 적합한 양액조성 개발

환경요인에 따른 상추의 생육주기별 양수분 흡수특성과 생육 모델링을 위해 적산 일사량별 상추의 생육을 조사하였다.

상추를 1.5L 용기당 1개체씩 정식하여 처리당 3 반복으로 배치하였으며, 처리별 평균 광도는 일사계(LI190SB, LICOR)로 측정하여 I, II 및 III 각각 13.7, 88.5 및 $182.9 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 로 20W 형광등(FL20T10PG, 제보조명)을 초판에서 50cm 정도 위에 60cm 너비에 등간격으로 10개씩 설치하였다. I은 10개의 형광등 중 2개만 조사하고 50% 한랭사를 이용하여 두겹으로 차광하였으며, II는 4개의 형광등을 조사하고 차광하지 않았다. V는 2중 피복한 상태의 자연광이고 IV는 자연광을 50% 한랭사로 한겹 차광한 처리구로 차광률은 42.8(호린 날)~51.7%(맑은 날)이었다. I~III의 인공전조시간은 08:00~20:00로 12시간이었으며, 자연광의 경우 인공광원의 간섭을 막기위해 중간에 알루미늄 혼입필름으로 차단하였다.

양액조성으로 1단계에 K, Ca, Mg 및 P는 3.78, 1.75, 2.10 및 $1.80 me \cdot L^{-1}$ 이었으며, 2단계에 각각 7.35, 2.625, 0.525 및 $2.25 me \cdot L^{-1}$ 이었다. 공급한 개체당 양액량은 1단계와 2단계 각각 1L 및 1.5L이었고, 매 2일 간격으로 생체중과 양액 감모량을

을 측정하고 양액 분석을 위해 양액을 30mL씩 채취하였다. 생육상의 기온은 $23.3 \pm 0.07^{\circ}\text{C}$ 이었고, 상대습도는 $84.9 \pm 0.63\%$ 이었다.

2. 결과 및 고찰

가. 일장 및 재배시기가 양액재배 미나리의 생육 및 품질에 미치는 영향

엽수, 초장, 경장 및 마디 등 전반적인 생육반응에서 16시간 일장처리가 우세하였으나 포복경 발생수는 16시간 일장처리보다 자연일장과 광중단처리에서 많았다. 포복경은 자연일장보다 16시간 일장과 광중단 처리구에서 길었는데, 이는 포복경의 생성에는 단일조건이, 포복경의 발육에는 장일조건이 각각 좋은 것으로 생각된다(자료 미제시). 광중단에 따른 미나리의 생육을 살펴보면, 장일처리에서 나타나는 현상인 마디의 생성으로 보아 1시간의 광중단만으로도 장일효과가 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 2-73. Chlorophyll contents of water dropwort at harvest sown at different seasons.

Chlorophyll ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	18 June	20 July	20 Aug.	20 Sep.	5 Oct.	5 Nov.	20 Dec.
a	58.5/3.9 ^z	57.1/4.1	67.4/7.4	58.6/7.5	61.8/9.6	70.0/10.0	67.0/8.2
b	21.1/1.8	18.4/1.6	22.2/3.2	18.8/2.8	18.3/3.2	20.8/3.6	30.1/3.0
Total	79.6/5.7	75.5/5.7	89.8/10.6	77.4/10.3	80.1/12.8	90.8/13.6	87.1/11.2
Ratio(a/b)	2.8/2.2	3.1/2.6	3.0/2.3	3.1/2.7	3.4/3.0	3.4/2.8	3.3/2.7

^zLeaf/stem (18 June~20 July) or petiole (20 Aug.~20 Dec.) part.

계절에 따른 일장반응을 알아보기 위해 매달 파종하여 재배하였더니, 정식 후 10일경 각각의 초장은 차이가 없었으나 20일경의 초장은 큰 차이를 보여 생육 전반기에는 일장에 의한 차이가 적고 중반기부터 그 효과가 나타나는 것으로 생각된다. T/R ratio는 일장에 민감하게 반응하는 것으로 나타났는데, 일장이 짧아질수록 낮아지고 계절에 따른 일장반응과 인위적인 일장처리 사이에는 유사한 결과를 보였다.

Table 2-74. Ascorbic acid contents (mg %, FW) of water dropwort at harvest sown at different seasons.

Plant part ^z	20 July	5 Aug.	20 Aug.	5 Sep.	20 Oct.	5 Nov.	5 Dec.	20 Dec.
Leaf	24.2	36.8	40.7	42.8	40.3	42.9	32.7	37.8
Stem	3.5	9.0	7.8	7.5	7.3	8.6	5.0	8.6

^zLeaf/stem (July 20~Aug. 5) or petiole (Aug. 20~Dec. 20) part.

자연일장에서의 엽록소함량은 파종 시기가 늦어질수록 즉 일장이 짧아질수록 높아졌는데, 이는 16시간 이장 및 광중단 처리에서와 일치하지 않았다. 그것은 엽록소 측정시기가 달라서 같은 초장이라도 생육일수가 많을수록 엽의 단위면적당 엽록소 함량이 높기 때문인 것으로 생각된다(Table 2-73, 2-75). Ascorbic acid 함량은 엽록소와 비슷한 경향을 보였다(Table 2-74, 75).

Table 2-75. Chlorophyll and ascorbic acid contents of hydroponically grown water dropwort at different photoperiod.

Content	NL ^z	NB	16 hrs
Chl. a ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	49.3/6.4 ^y	49.6/4.1	50.2/3.9
Chl. b ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	13.0/2.1	13.4/1.4	14.5/1.3
Total chlorophyll ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	62.3/8.5	63.0/5.5	64.7/5.2
Ratio of chl. (a/b)	3.8/3.0	3.7/2.9	3.5/3.0
Ascorbic acid (mg %, FW)	35.8/9.5	31.1/8.5	32.0/6.1

^zNL;natural light, NB;night break, 16 hrs;illumination of 16 hrs with incandescent lamp.

^yLeaf/stem (20 July~5 Aug.) or petiole (20 Aug.~20 Dec.) part.

나. 적산일사량과 일수에 따른 상추와 미나리의 생육특성

1) 미나리 생육특성 구명

적산일사량에 따른 미나리 생육(Fig. 2-43)은 초기에 생체중과 건물중의 더딘 증가를 보이다 생체중은 100~130, 건물중은 $120 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 에서 곡점을 가지며, 그 이후 급속적인 성장을 나타냈다. 잎의 발달은 엽수의 경우 거의 직선적으로 증가하여 생체중이나 건물중과 다른 양상을 보였으나, 엽면적은 건물중의 변화와 비슷한 양상을 보였다. 건물중과 엽면적의 증가는 생체중의 증가보다 조금 늦게 나타나는데 생체중의 변화는 당일 일사량의 변화에 따른 수분흡수에 크게 영향을 받는 것으로 생각된다.

실험 기간 동안 미나리 생육은 전형적인 S자 곡선을 나타내지 않았지만, 실험 종료 이후에 생육이 정점에 이를 것으로 생각되며 이 시기는 지상부가 과번무하여 상품성이 떨어질 것으로 예측된다.

생육기간 동안 일사량의 변화에 따른 생체중과 건물중의 증가량(Fig. 2-43)은 불규칙하게 나타나는데, 정식후 10일 전후까지 낮은 증가치를 보이다 급격한 증가

를 나타냈다. 특이한 것은 14일째와 18일째에 생체중과 건물중의 급격한 감소가 나타나고 그 이후에 다시 증가하는데, 이는 전날의 일사량에 크게 영향을 받는 것으로 생각된다. 양일 모두 전날의 일사량이 급격히 감소하였고 충분한 광합성이 이루어지지 않아 당일 일사량뿐만 아니라 전일의 일사량도 생육에 크게 기인하는 것으로 보인다. 따라서 12일째의 일사량이 급격히 감소하여 14일째 생육이 저조하였고, 16일째부터 22일째까지는 일사량이 완만하게 감소하여 생체중과 건물중의 증가량도 완만하게 감소한 것으로 나타났다.

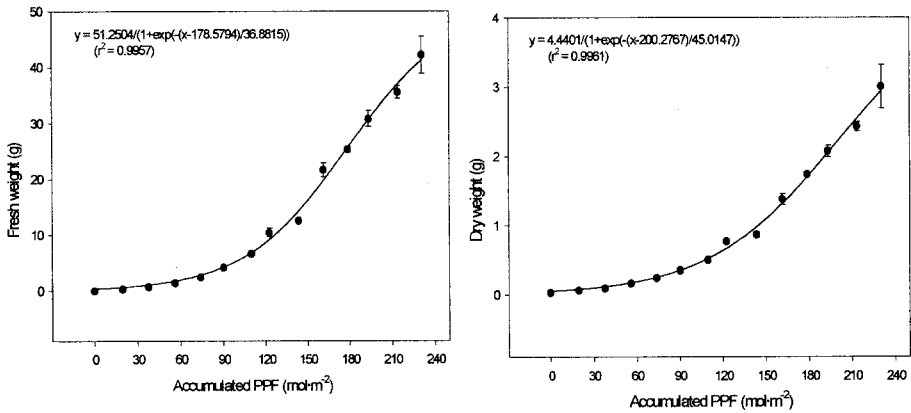


Fig. 2-43. Regressions among fresh weight, dry weight and accumulated photosynthetic photon flux density (PPF) in hydroponic culture of water dropwort. Bars indicate standard errors.

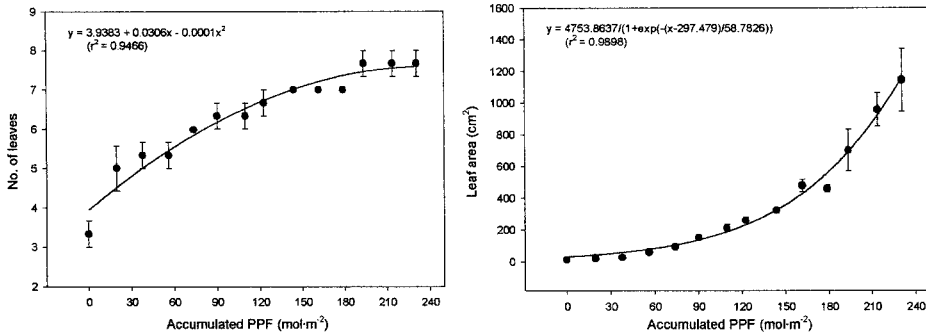


Fig. 2-44. Regressions among number of leaves, leaf area and accumulated PPF in hydroponic culture of water dropwort. Bars indicate standard errors.

곡점 이후의 생체중과 건물중의 증가는 엽수가 증가함에 따라 잎 각각의 엽면적이 함께 증가하기 때문에 일정 면적 이상 확보한 잎의 수에 따라 미나리의 생육 특성을 나타내는 것으로 생각된다.

그리고 일사량에 따른 최대엽의 면적과 총엽면적의 변화(Fig. 2-46)를 보면 Fig. 2-45와 약간 다른 양상을 나타냈다. 건물중과 생체중은 일사량이 감소하면 완만하게 감소하는 경향을 보인 반면 최대엽의 반응은 빠르게 나타났으며, 일사량 감소에 따른 개별적인 엽면적의 감소폭에 따라 총엽면적에 영향을 받는 것으로 생각된다. 또한 일사량이 전일에 비해 감소하더라도 엽면적의 변화가 서로 다르게 나타나는데 일사량이 일정 수준 이상이면 생육량의 증감 폭이 상대적으로 작아지는 것을 알 수 있다.

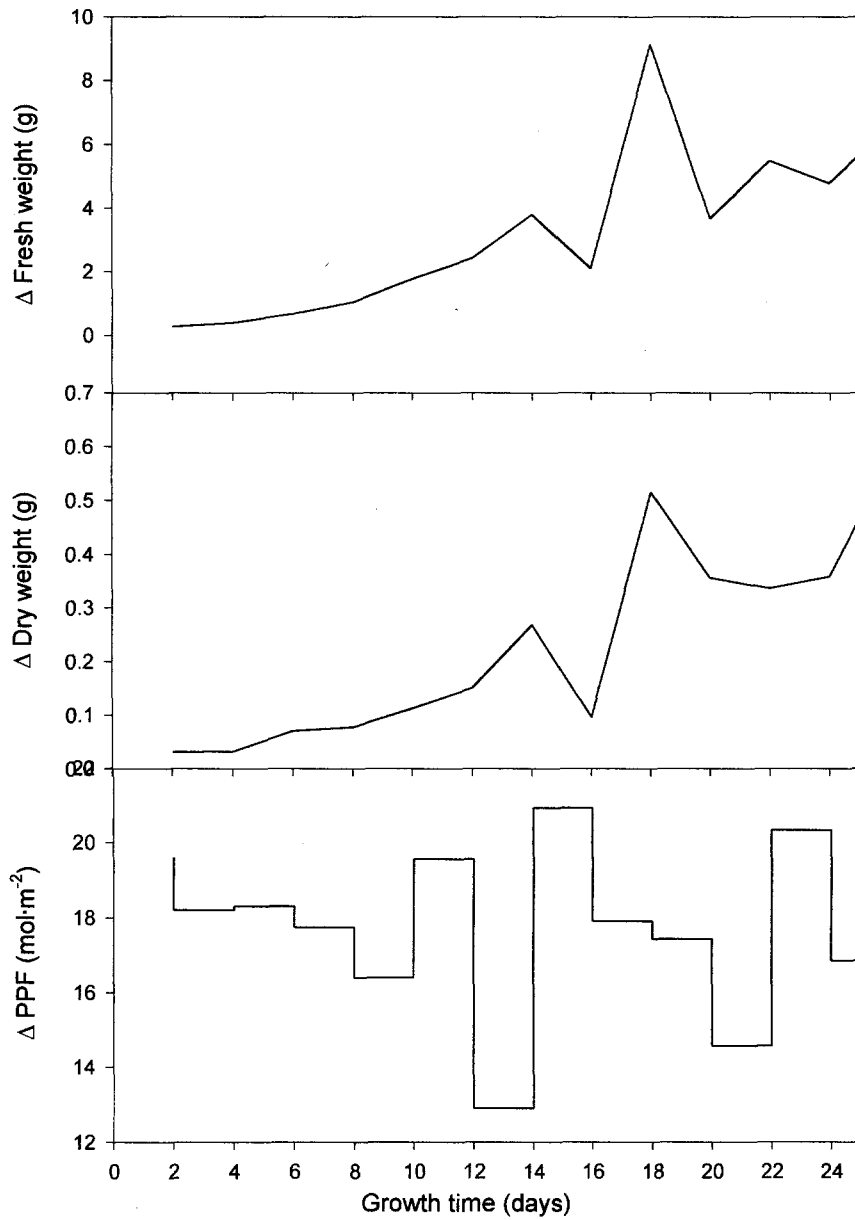


Fig. 2-45. The daily changes of fresh, dry weight and PPF during growth of water dropwort.

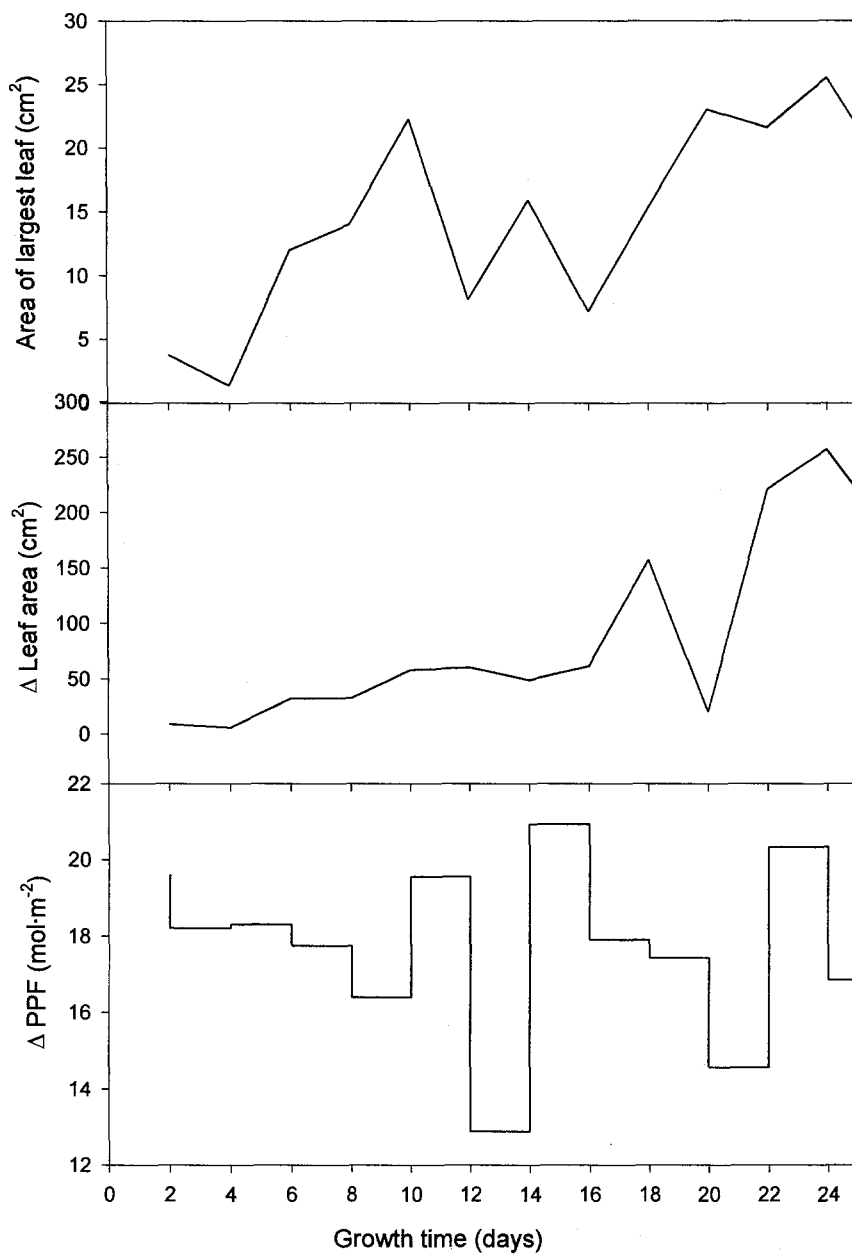


Fig. 2-46. The daily changes of area of largest leaf, leaf area and PPF during growth of water dropwort.

2) 상추 생육특성 구명

생체중의 변화(Fig. 2-47)는 미나리보다 생육이 빠르게 나타나 $90 \sim 110 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 사이에서 곡점을 가지며 건물중은 이보다 $10 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 뒤에 곡점이 나타났다. 특히 초기 건물중의 증가폭이 생체중보다 완만하였다. 엽수는 1차 직선 회귀식에 적합하게 나타나($r^2=0.9899$) 직선적으로 증가한 반면 엽면적은 건물중과 유사한 경향을 나타냈다(Fig. 2-48). 생체중, 건물중 및 엽면적의 r^2 는 각각 0.99, 0.97 및 0.98로 상당히 높게 나타나 실시간 계측을 이용한 모델링 개발의 기초자료로 충분히 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

일사량에 따른 생체중과 건물중(Fig. 2-49) 및 최대 엽면적과 엽면적 변화(Fig. 2-50)를 보면 미나리와 유사하게 전일의 일사량에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 22일 이후에 급격한 증가를 보여 이 시기의 일사량에 따라 생육후기의 특성이 달라질 수 있을 것으로 생각되며, 이 때 급격한 성장이나 엽면적의 증가는 양수분 흡수와 불균형을 이루고 영양상태가 나빠져 품질은 저하될 것으로 생각된다.

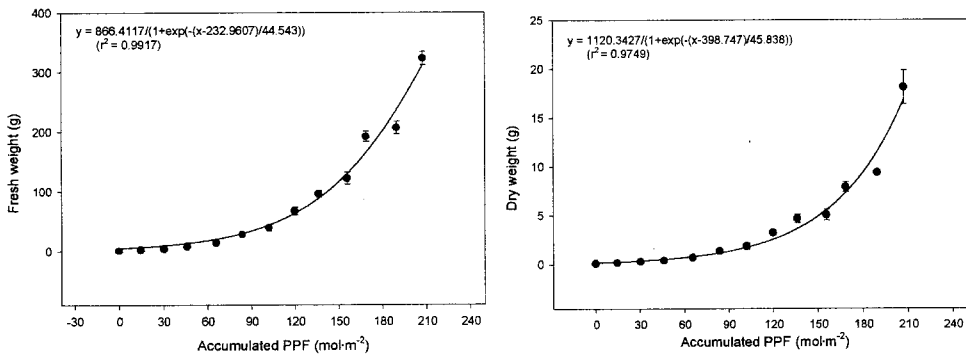


Fig. 2-47. Regressions among fresh weight, dry weight and accumulated PPF in hydroponic culture of leaf lettuce. Bars indicate standard errors.

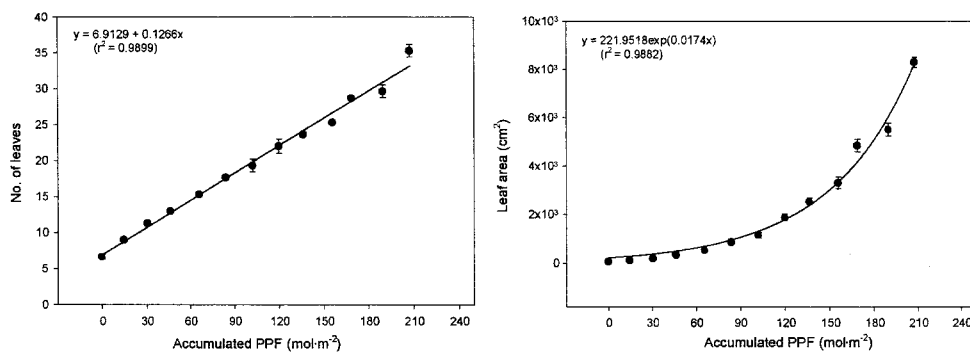


Fig. 2-48. Regressions among number of leaves, leaf area and accumulated PPF in hydroponic culture of leaf lettuce. Bars indicate standard errors.

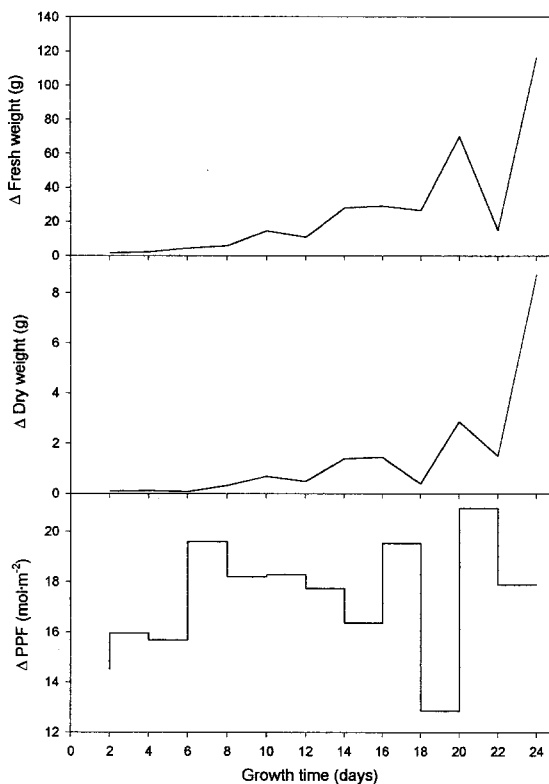


Fig. 2-49. The daily changes of fresh, dry weight and PPF during growth of leaf lettuce.

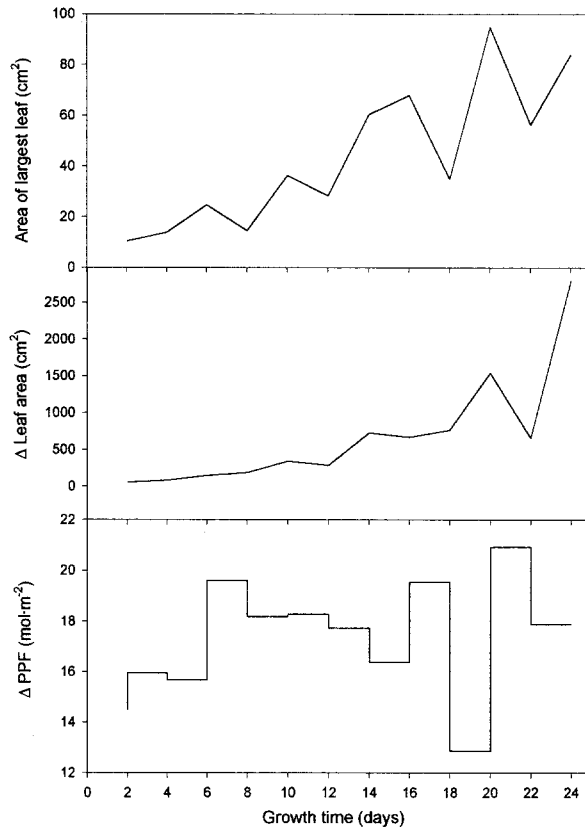


Fig. 2-50. The daily changes of area of largest leaf, leaf area and PPF during growth of leaf lettuce.

이상의 결과로 미나리와 상추의 생육은 크게 두 단계로 구분되었으며, 미나리의 경우 정식 후 적산일사량이 $100\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, 상추는 $110\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 근처에서 생육의 전환이 생기고 전후로 양수분 흡수도 달라질 것으로 생각되며, 생육을 최적화하기 위해서는 전기와 후기로 나누어 각각에 적합한 양액조성을 구명하고 공급하는 것이 필요할 것이다.

다. 생육단계에 따른 미나리와 상추의 양수분 흡수 특성과 생육

1) 미나리 생육특성에 따른 양액흡수 변화

각각의 양액조성에 따른 전기의 생육 차이를 보면(Table 2-76), 엽수와 마디 수에는 영향이 없었고, 생체중, 건물중 및 엽면적에 차이가 발생해 4번째와 7번째 양액조성에서 가장 우수하였고 1번째 양액에서 좋았다. 이 조성은 K의 비율이 높고, Ca과 Mg의 비율이 낮은 양액이었으며, 4번째 양액이 가장 우수하여 K과 Ca은 같은 비율로 중간 농도로 존재하며, Mg은 낮은 비율로 존재하는 것이 상추 전기 생육에 적합할 것으로 생각된다.

특히 2번째 양액조성에서 생육이 가장 열악하였는데 이는 K과 Mg의 비율이 낮고 Ca의 비율이 높았던 조성으로 $K \geq Ca \geq Mg$ 의 비율로 조절하는 것이 생육에 유리할 것이다.

생육후기(Table 2-77)에는 7과 4번째 조성에서 생육이 우수하였으며 1번째와 3번째 조성에서 양호하게 나타나 생육 전기와 비슷하지만 약간 다른 양상을 보였다. 생육이 좋았던 7번째 양액은 세 요소의 비율이 중간 정도로 K 0.47, Ca 0.40 및 Mg 0.13의 조성이었다.

또한 생육이 열악한 조성은 2번째 양액으로 생육전기와 유사하게 미나리 생육에 적합하지 않은 것으로 밝혀졌다.

Table 2-76. Macromorphological characteristics of the water dropwort at the end of early stage growth.

Solution No.	Plant height (cm)	No. of leaves	No. of internodes	Average length of internode	Fresh weight (g)		Dry weight (g)		Leaf area (cm ²)
					Leaf	Root	Leaf	Root	
1	28.2 ab ^z	5.8	4.0	0.755	7.77 b	2.19 a	0.529 ab	0.103 ab	241.9 ab
2	26.6 b	5.2	3.6	0.633	5.99 c	1.54 b	0.421 c	0.086 b	177.2 c
3	28.5 ab	5.8	3.8	0.825	7.66 b	2.11 a	0.478 bc	0.097 ab	215.7 abc
4	30.0 a	6.0	4.0	0.775	8.91 a	2.35 a	0.593 a	0.112 a	249.2 a
5	27.6 b	5.6	3.8	0.663	7.36 b	2.09 a	0.499 b	0.106 ab	197.4 bc
6	28.9 ab	6.0	3.8	0.758	7.38 b	2.28 a	0.494 bc	0.108 a	215.5 abc
7	28.4 ab	6.0	4.0	0.840	8.13 ab	2.36 a	0.536 ab	0.113 a	233.2 ab

^z Duncan's multiple range test, p=0.05

Table 2-77. Macromorphological characteristics of the water dropwort at the end of later stage growth.

Solution No.	Plant height (cm)	No. of leaves	No. of internodes	Average length of internode	Fresh weight (g)		Dry weight (g)		Leaf area (cm ²)
					Leaf	Root	Leaf	Root	
1	45.2 c ^z	6.4	5.2 ab	2.32 b	22.39 bc	3.60 a	1.380 ab	0.169 a	620.5 a
2	42.2 d	5.8	4.6 b	2.29 b	19.45 c	3.20 ab	1.239 b	0.162 a	508.6 ab
3	46.6 c	6.0	5.2 b	2.28 b	22.39 bc	3.69 ab	1.367 ab	0.175 a	595.7 ab
4	50.0 at	6.4	5.2 ab	3.01 ab	25.40 ab	3.41 a	1.582 a	0.162 a	648.9 a
5	50.2 at	6.4	4.6 a	3.37 a	22.37 bc	3.38 b	1.281 b	0.158 a	471.5 b
6	49.2 b	6.6	5.0 ab	2.93 ab	21.89 bc	2.75 b	1.252 b	0.123 b	502.5 ab
7	52.6 a	6.6	5.4 a	3.30 a	26.61 a	3.74 a	1.588 a	0.174 a	639.6 a

^z Duncan's multiple range test, p=0.05

일일 흡수량과 EC의 변화를 보면(Fig. 2-51), 생육전기에 일사량 변화에 따른 변화를 보여 흡수량은 초기를 제외하곤 일사량이 감소해도 꾸준히 증가하였고 8일 이후에 EC의 감소율이 다르게 나타났다. 특히 10일째에 생육이 불량했던 2와 5번째 양액에서 다른 처리보다 감소하였다.

반면 생육 후기에는 생육전기보다 양액 흡수량도 증가하였고 EC도 많이 감소하였다. 후기에는 생육이 왕성하기 때문에 양액 조성에 따른 생육반응이 빨리 나타나 4일째부터 처리간 차가 발생하여 처리 종료시인 8일째에 생육이 왕성한 양액 조성에서는 완만한 증가를 보인 반면 생육이 불량한 2, 5번째 조성에서 크게 감소하였다.

엽부위별 엽면적과 포복경의 엽면적 변화(Fig. 2-52)에서는 생육초기에 3번째 잎까지는 비슷하였으나 최대엽인 5번째 잎에서 차이가 크게 나 1, 4번째 조성에서 가장 넓었고 6, 7번째 잎에서 비슷해지는 경향을 보였으며, 후기에는 3번째 잎부터 6번째 잎까지 생육이 양호한 조성과 불량한 조성간에 큰 차가 발생했다. 반면에 포복경의 엽면적은 초기 잎부터 차이가 나타나 후기에 뚜렷한 양상을 보였다. 따라서 최대 성엽의 엽면적에 따라 생체중과 건물중이 달라지고 처리간 차이가 발

생하는 것으로 생각된다.

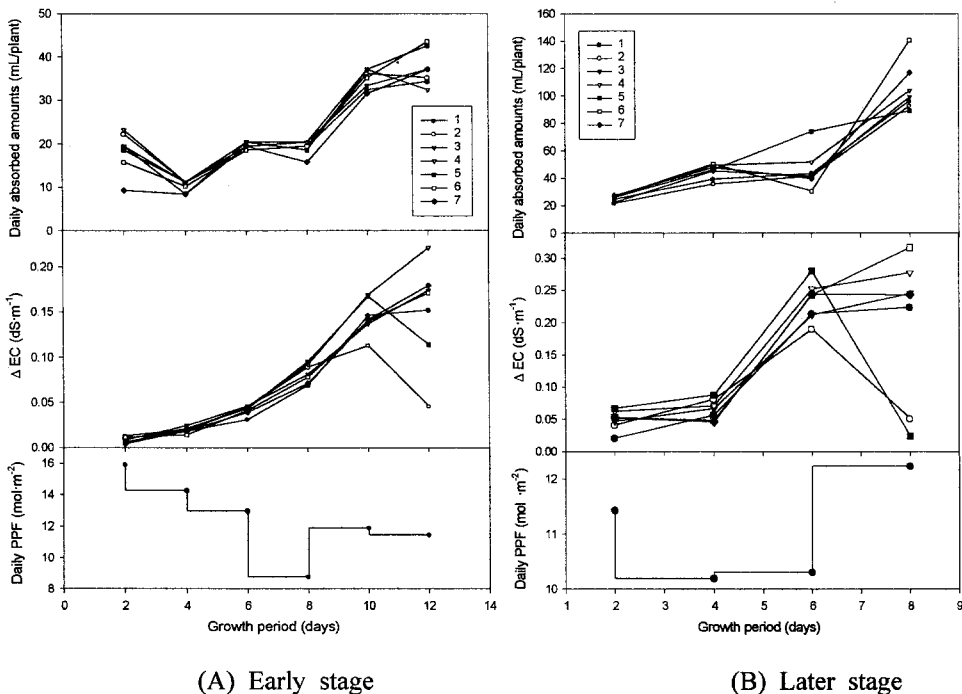


Fig. 2-51. The daily absorbed amount of nutrient solution and changes of EC and PPF in the growth of water dropwort. In legends, the number represents solution number of table 2.

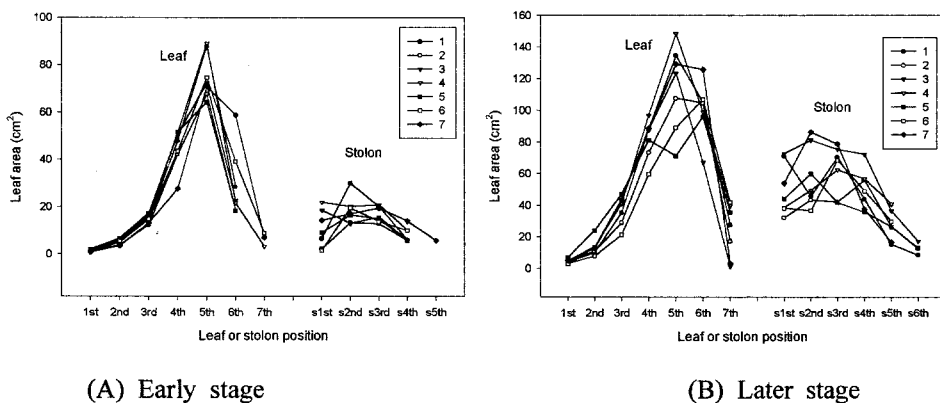


Fig. 2-52. The comparison of leaf and stolon area by position of water dropwort cultured among 7 nutrient solutions in early growth.

2) 상추 생육특성에 따른 양액흡수 변화

전기의 상추 생육(Table 2-78)은 엽수는 차이가 없었으나 생체중과 건물중 및 엽면적에서 조성간 영향이 다르게 나타나 3번째와 1번째 조성에서 가장 우수하였고, 2번째와 7번째 양액조성에서 가장 열악한 생육을 보였다. 생육이 양호한 양액의 원소간 비율을 보면 역시 Ca보다 K의 비율이 높음을 알 수 있고, Mg의 비율은 중요하지 않았다. 반면 생육이 열악한 조성은 K과 Ca의 비율이 비슷하거나 더 낮았다.

그리고 후기에는 1번째에서 생육이 가장 우수하였고 4, 6 및 7번째에서 생육이 양호하여 전기와 다른 반응을 보였고 2번째에서 생육이 열악하여 Ca의 비율이 높을수록 생육은 저조하였다(Table 2-79).

Table 2-78. Macromorphological characteristics of the leaf lettuce at the end of early stage growth.

Solution No.	No. of leaves	Fresh weight (g)		Dry weight (g)		Leaf area (cm ²)
		Leaf	Root	Leaf	Root	
1	21.0	46.69 a ^z	10.012 a	2.300 a	0.487 ab	1,237.3 ab
2	20.2	39.36 c	8.167 b	1.427 c	0.421 b	1,102.0 b
3	20.6	46.12 a	9.984 a	2.454 a	0.512 a	1,279.8 a
4	20.0	45.68 ab	9.432 ab	1.969 b	0.456 ab	1,152.6 ab
5	19.4	44.84 ab	9.124 ab	2.186 ab	0.426 b	1,126.1 b
6	20.2	44.59 ab	8.866 ab	1.887 b	0.435 ab	1,114.9 b
7	19.4	41.14 bc	8.385 b	1.918 b	0.458 ab	1,092.2 b

^z Duncan's multiple range test, p=0.05

Table 2-79. Macromorphological characteristics of the leaf lettuce at the end of later stage growth.

Solution No.	No. of leaves	Fresh weight (g)		Dry weight (g)		Leaf area (cm ²)
		Leaf	Root	Leaf	Root	
1	32.0 a ^z	197.7 a	19.49 a	8.69 a	0.94 ab	4808.3 a
2	30.8 ab	156.0 d	17.91 ab	7.42 b	0.90 b	4013.1 c
3	31.4 ab	172.9 bcd	16.80 b	7.33 b	0.85 b	4333.7 abc
4	32.0 a	196.1 ab	18.26 ab	8.81 a	0.97 ab	4732.2 ab
5	30.0 b	170.8 cd	17.25 ab	8.10 ab	0.92 ab	4160.6 bc
6	31.8 a	181.2 abc	19.39 a	8.59 a	1.05 a	4472.6 abc
7	32.4 a	180.5 abc	16.81 b	8.59 a	0.85 b	4674.0 ab

^z Duncan's multiple range test, p=0.05

생육 전기에 일일 양액흡수량(Fig. 2-53)은 조성간 차이가 없었으나 후기에는 뚜렷하게 나타나 처리 초기부터 흡수량이 높았지만 처리후기에는 3번째 조성을 제외한 나머지 모두 유사한 경향을 보였다. EC의 변화는 전기 6일째까지 비슷하다 8일째에 차이가 나타나 10일째에는 생육이 양호한 3번째 조성에서 EC가 급격히 높아져 양분보다는 물을 더 흡수한 것으로 나타났다. 또한 생육후기에도 8일째 생육이 왕성한 조성에 EC가 급격히 감소해 물보다는 양분 흡수가 원활하게 나타나 전기와 다른 양상을 나타냈다. 이러한 경향은 전일의 일사량에 영향을 받은 것으로 생각되며, 전일의 일사량이 많으면 흡수량보다 증산량이 많아 물의 흡수가 많은 것으로 보이며, 흐린 날이나 구름 낀 날에는 상대적으로 양분보다 물의 흡수가 적어 일사량에 따른 각 원소별 흡수 특성을 고려해야 할 것으로 생각된다.

Table 2-80에 각 단계별 총 양액 흡수량을 나타냈는데, 대체로 생육이 양호한 조성(미나리 전기 4, 후기 7, 상추 전기 3 및 후기 1번째)에서 양액의 흡수가 다른 처리보다 높았고 생육이 열악한 2번째 조성에서 양액의 흡수량이 적었다.

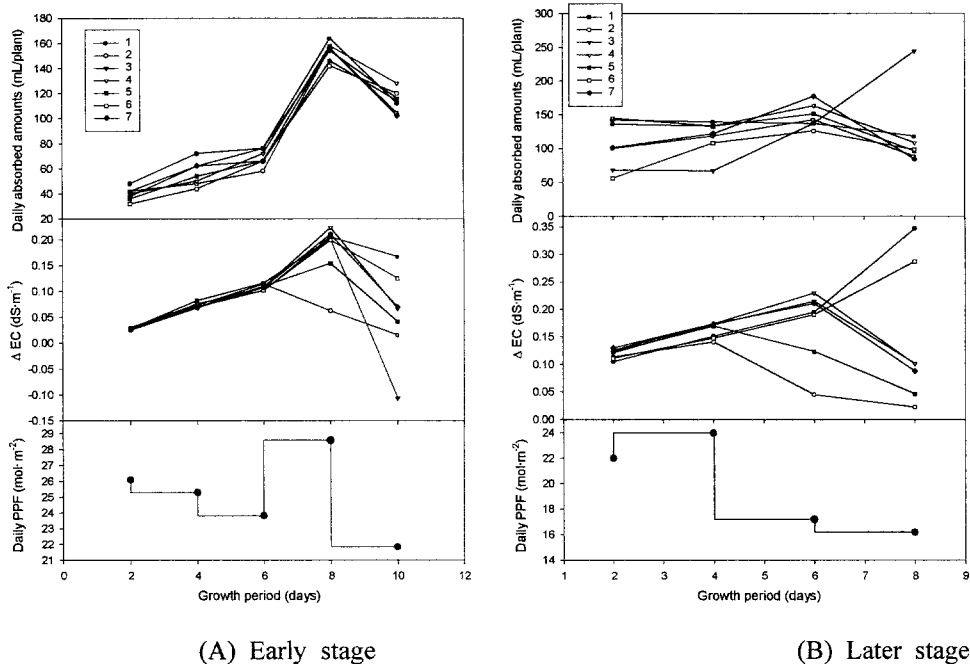


Fig. 2-53. The daily absorbed amount of nutrient solution and changes of EC and PPF in the growth of leaf lettuce.

Table 2-80. The absorbed amounts of nutrient solution of the water dropwort and the lettuce. Total amount of nutrient solution supplied was 20 L.

Solution No.	Water dropwort		Lettuce	
	Early st.	Later st.	Early st.	Later st.
	<i>mL/plant</i>			
1	135.2	203.7	472.0	536.0
2	142.6	191.7	408.0	448.8
3	138.9	208.3	450.0	516.0
4	143.5	231.5	448.0	548.8
5	148.2	235.2	416.0	516.0
6	142.6	248.1	404.0	388.0
7	121.3	231.5	424.0	484.0

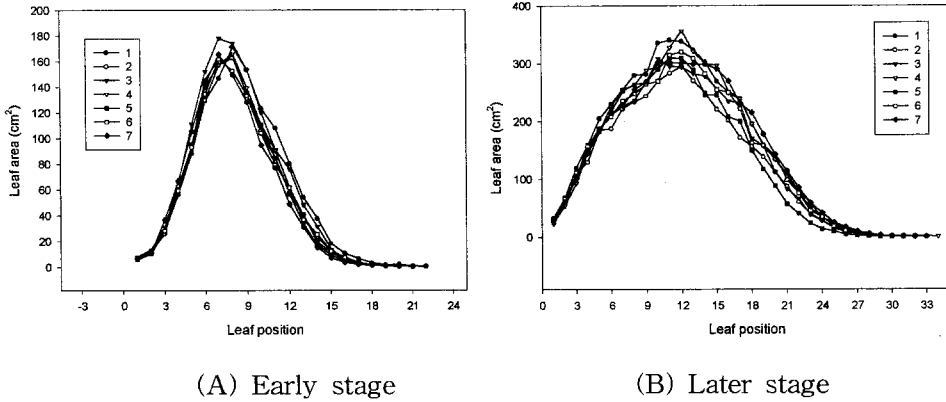


Fig. 2-54. The comparison of leaf area by position of leaf lettuce cultured among 7 nutrient solutions.

엽 부위별 엽면적의 변화(Fig. 2-54)를 보면 생육 전기에 뚜렷한 차이는 나타나지 않았으나 새로 나오는 신엽의 수가 더 많은 것을 알 수 있으며, 후기에는 6번째 잎부터 차이가 나타나 생육이 좋을수록 각 부위별 엽면적이 더 넓은 것을 알 수 있다. 따라서 생육이 왕성할수록 잎의 분화가 빠르고 먼저 전개한 잎은 빠른 속도로 넓어지기 때문에 생육량에 차이가 발생하는 것으로 생각된다.

이상의 실험에서 미나리와 상추의 생육을 그 특성에 따라 2단계로 나눌 수 있고, 단계별 양액 조성에서도 차이가 나타났으며, 이에 맞는 농도를 구명하여야 할 것이다. 또한 일사량에 따른 각 원소별 흡수 특성을 구명하여 실시간 계측에 따른 적합한 양액을 공급하여야 생육을 최적화할 수 있을 것으로 생각된다.

라. 적산 일사량에 따른 상추의 생육 모델링과 적합한 양액조성 개발

Table 2-81. The n/w values of each element by photosynthetic photon flux densities in leaf lettuce. The average PPF were (I) 13.7, (II) 88.5, (III) 182.9 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, (IV) 50% shading of natural light, and (V) natural light, respectively.

Element	Growth stage	I	II	III	IV	V
		$\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$				
K	Early	1.39 ± 0.05	7.61 ± 0.76	6.07 ± 0.16	7.48 ± 0.41	8.44 ± 0.34
	Later	23.89 ± 1.27	17.65 ± 0.18	16.83 ± 0.12	19.93 ± 0.40	19.57 ± 1.19
Ca	Early	0.07 ± 0.06	0.06 ± 0.02	0.14 ± 0.10	0.25 ± 0.11	0.26 ± 0.04
	Later	3.70 ± 0.28	2.52 ± 0.06	2.66 ± 0.03	2.64 ± 0.10	2.83 ± 0.13
Mg	Early	0.69 ± 0.04	0.48 ± 0.11	0.54 ± 0.15	0.39 ± 0.12	0.78 ± 0.09
	Later	0.25 ± 0.08	0.79 ± 0.05	0.86 ± 0.02	0.84 ± 0.07	0.84 ± 0.06
P	Early	1.33 ± 0.72	2.57 ± 0.16	2.39 ± 0.07	2.05 ± 0.03	2.98 ± 0.06
	Later	3.16 ± 0.58	3.38 ± 0.09	3.63 ± 0.12	3.56 ± 0.33	3.83 ± 0.38

2일 간격으로 양수분 흡수량(양액 감모량)을 측정하고 양액을 채취하여 원소별로 분석한 결과를 이용하여 Yamazaki's formula에 의한 n/w 값의 결과는 Table 2-83과 같다. 적산 일사량별로 양수분 흡수 특성은 매우 다르게 나타났는데, K은 1단계에 광보상점 근처의 광도에서 흡수가 가장 낮았고, 일정한 광도 이상에선 6.1~8.4 $\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ 근처로 높았다. 반면 2단계에서는 월등히 높은 n/w 값을 보여 중기 이후에 K의 요구가 상당히 높은 것으로 생각된다. Ca도 K과 유사한 결과를 보여 생육 전기보다 후기에 높은 흡수량을 보였다. 특이할 점은 광보상점 근처의 광도에서도 K과 Ca의 요구량이 상대적으로 높은 것으로 나타났는데, 호흡에 필요한 동화산물의 부족으로 스트레스에 의한 과잉흡수로 추측된다. Mg은 생육전기에 저광도 조건에서 흡수가 높고, 후기에는 오히려 감소하는 상반된 결과를 나타내 일정한 경향을 보이지 않았다. P은 생육전기보다 후기에 1 $\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ 정도 높은 요구량을 나타냈다. 이상의 결과로 보아 전반적으로 적산 일사량이 적을수록 양분 요구도는 낮아지는 것을 알 수 있다.

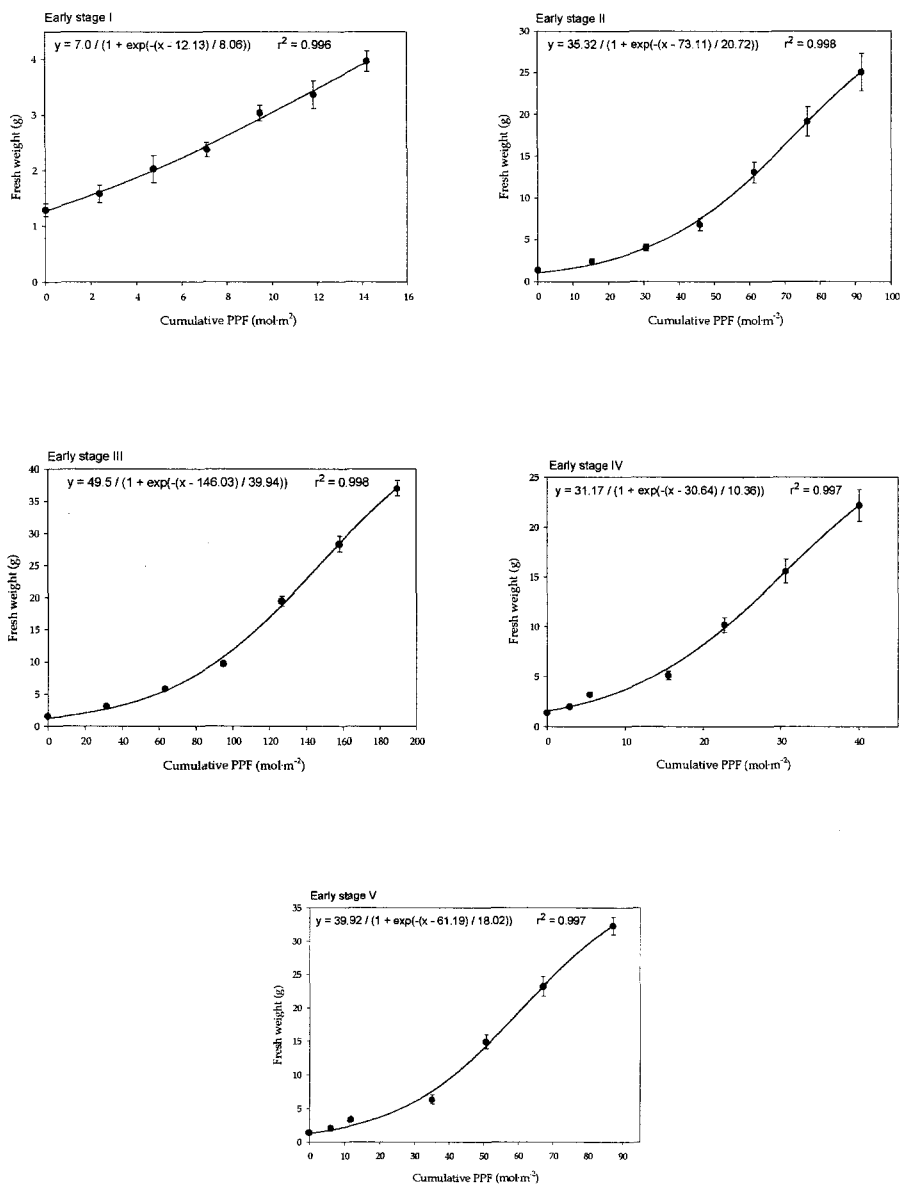


Fig. 2-55. Relationship between the cumulative PPF and the fresh weight of early stage growth in leaf lettuce. The average PPF were (I) 13.7, (II) 88.5, (III) 182.9 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, (IV) 50% shading of natural light, and (V) natural light, respectively.

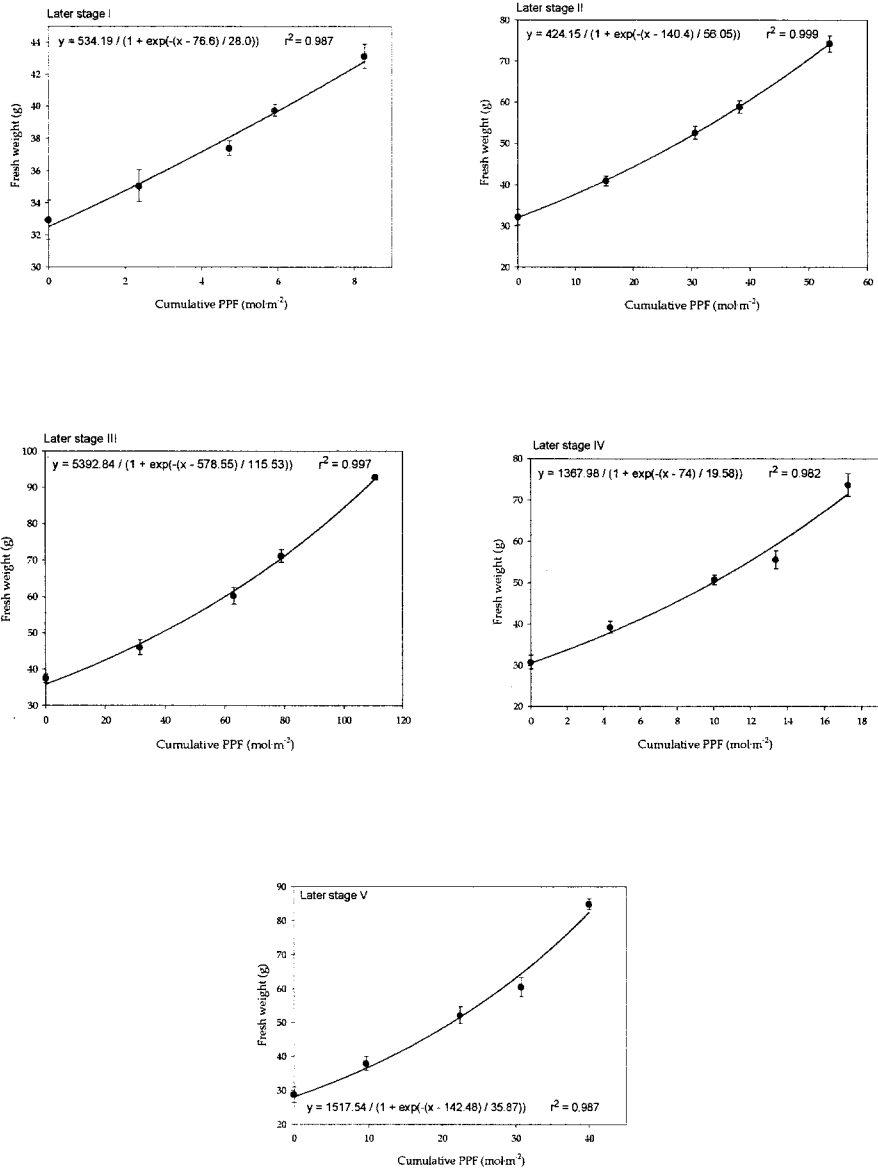


Fig. 2-56. Relationship between the cumulative PPF and the fresh weight of later stage growth in leaf lettuce. The average PPF were (I) 13.7, (II) 88.5, (III) 182.9 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, (IV) 50% shading of natural light, and (V) natural light, respectively.

각 적산 일사량에 따른 생체중의 변화를 회귀분석한 결과는 Fig. 2-60 및 2-61과 같다. 1단계에서 적산 일사량에 따른 생체중 증가는 회귀계수(r^2)가 0.99 이상으로 상당히 높아 적산 일사량에 대한 생체중 증가의 회귀모형이 적합한 것으로 보인다. 한편 낮은 적산 일사량 조건(I)에서는 직선에 가까운 회귀곡선을 나타낸 반면, 높은 적산 일사량 처리(II~V)에서는 S자형 곡선을 나타냈다. 이는 낮은 적산 일사량에서 광합성이 원활하게 이루어지지 않아 광합성 대사산물을 유지에 필요한 호흡에 거의 소모하여 생육이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 대체적으로 1단계에서는 초기에 생체중이 더디게 증가하다가 일정한 적산 일사량 이후에 급격히 증가하는 양상을 보여, 각 시기에 따른 양수분 흡수 특성이 다르게 나타나며 이에 따른 양액조성을 달리 조절할 필요가 있다. 2단계에서도 r^2 가 0.98 이상으로 반응변수를 잘 설명해 준다고 볼 수 있다. 모든 처리에서 적산 일사량에 따라 생체중이 거의 직선적으로 증가하는 양상을 보였다(Fig. 2-62). 높은 적산 일사량 조건에서는 생육중기 이후 광합성이 활발하고 생체중이 급속하게 증가하게 되므로 적산 일사량에 대한 생체중은 거의 직선적으로 증가하게 된다.

상추 생육 증가에 따른 양액내 농도변화(Fig. 2-63)는 원소별로 다양하였는데, K과 P은 생육이 진전됨에 따라 감소하는 경향이었고, Ca과 Mg은 증가하거나 일정하게 유지되는 경향이였다. 단 K의 경우 생육 초에 일정하게 유지되다 중기 이후 약간 감소하는 경향이였으나 P은 생육 전반에 걸쳐 거의 일정하게 유지되었다. 그리고 적산 일사량이 높을수록 양액내 농도가 증가하거나 감소하는 경향이 뚜렷해졌고, 낮은 적산 일사량에서 흡수가 원활하지 못해 농도는 거의 일정하였다.

Fig. 2-63에 각 시기별 생체중 증가에 대한 양분 흡수 비율을 보면 조사 시점에 따라 K, Mg 및 P은 초기에 감소하다 낮은 적산 일사량을 제외한 다른 모든 처리에서 일정한 값을 보인 Ca은 낮은 값을 일정하게 유지하는 경향이였다. 생육 초기에 비율이 높은 것은 생체중 증가 폭이 그다지 크지 않고, 상대적인 흡수량이 높기 때문인 것으로 생각되며, 그 이후 일정하게 유지되는 것으로 보아 생체중 증가에 따른 양분 흡수량의 비율이 거의 같기 때문인 것으로 생각된다.

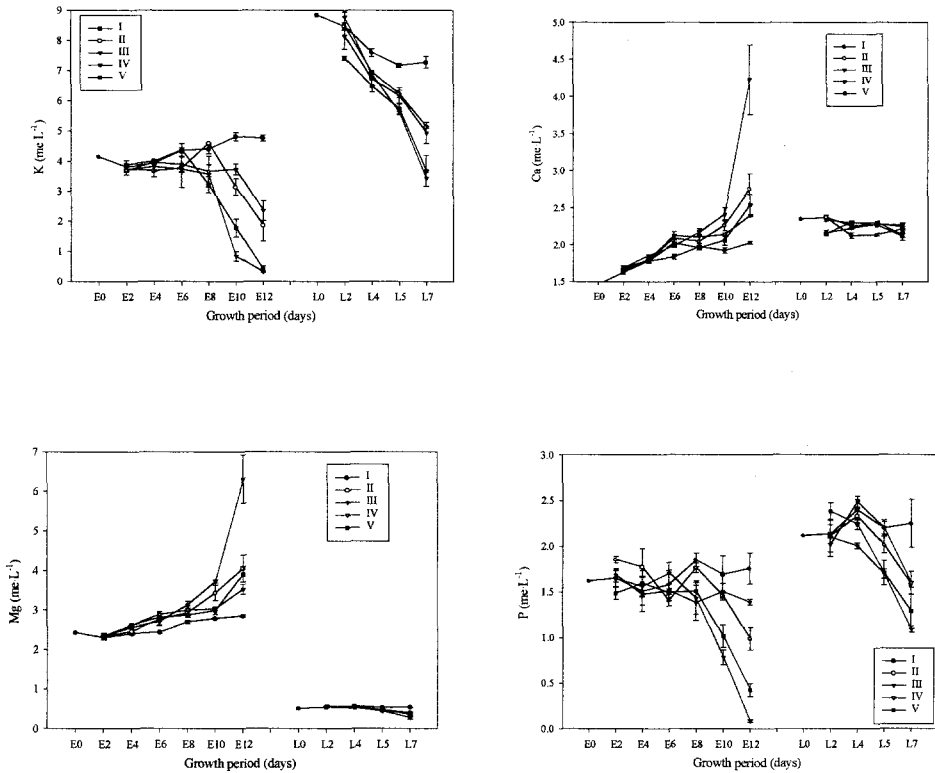


Fig. 2-57. The changes of nutrient concentration in nutrient solution in leaf lettuce grown different light intensities. The average PPF were (I) 13.7, (II) 88.5, (III) $182.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, (IV) 50% shading of natural light, and (V) natural light, respectively.

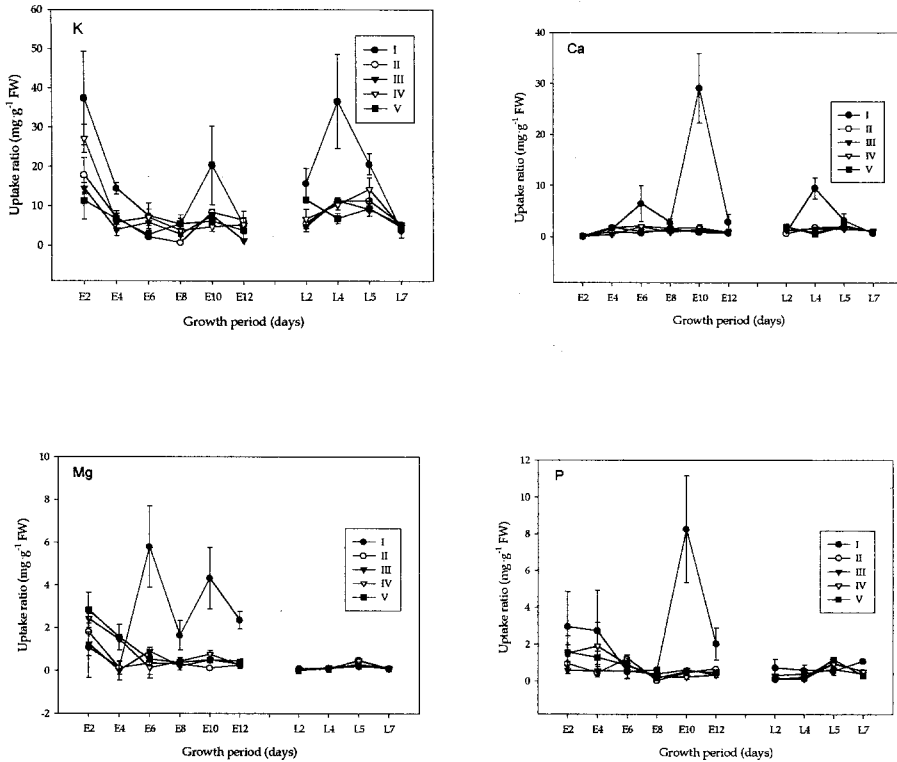


Fig. 2-58. The ratio of nutrient uptake amount over increase of fresh weight in different light intensities. The average PPF were (I) 13.7, (II) 88.5, (III) 182.9 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, (IV) 50% shading of natural light, and (V) natural light, respectively.

적산 일사량에 따른 상추의 생체중 증가량을 회귀분석하였다. 설명변수로서 측정 시기까지의 누적일사량(PPFn)과 측정시기 전의 2일간 누적일사량(PPFPn) 및 생육일수(DT)로 하였다. 각 설명 변수간의 조합을 통해 회귀계수가 높은 회귀식을 선별하여 Table 2-84에 나타내고, 각 변수의 계수를 Table 2-85에 나타내었다.

생육 1단계에서는 적산 일사량에 대한 각 식의 회귀계수가 0.90 이상으로 상당히 높게 나왔으며, 당일 누적 적산 일사량과 전 2일간의 누적 일사량 및 생육일수

로도 생체중을 예측할 수 있을 것으로 생각된다(Table 2-84의 Eq. 1). 2단계에서도 회귀계수가 0.85 이상으로 설명변수를 잘 반영하고 있지만, 1단계 모델식을 고려하였을 때 Eq. 3이 생체중 예측에 적용 가능할 것으로 생각된다.

Table 2-82. The equations of relationships between fresh weight (FWn) and environmental factors in leaf lettuce grown at different light intensities.

Growth stage	Equation No.	Equation ^z
Early	1	$a \times \text{PPFn} + b \times \text{DPn} + c \times \text{PPFm} + d$
	2	$a \times \text{PPFm} + b \times (\text{DT})^2 + c \times \text{DPn} + d$
	3	$a \times \text{PPFm} + b \times \text{PPFn} + c \times (\text{DT})^2 + d$
Later	4	$a \times (\text{PPFn})^2 + b \times \text{PPFn} + c \times (\text{DT})^2 + d \times \text{DT} + e$
	5	$a \times \text{Ln}(\text{PPFn}) + b \times (\text{DT})^2 + c$

^zFWn ; fresh weight on measuring day (g),

PPFn ; cumulative photosynthetic photon flux(PPF) to the day ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$),

DT ; growth period (day),

PPFPn ; cumulative PPF during 2 days before measuring time ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$),

PPFm ; $\text{PPFPn} \times \text{PPFn}$ ($\text{mol}^2 \cdot \text{m}^{-4}$),

DPn ; $\text{DT} \times \text{PPFn}$ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}$).

Table 2-83. The coefficients of equation in table 12.

Regression Equation (Eq. No.)	Coefficient					r^2	
	a	b	c	d	e		
Early	1	0.18638	0.01836	-0.00644	1.26669	-	0.926 ^{***}
	2	-0.00241	0.03228	0.02196	2.43069	-	0.912 ^{***}
	3	-0.00492	0.30117	0.06353	-1.92498	-	0.905 ^{***}
Later	3	-0.00670	0.54383	0.44922	32.32903	-	0.866 ^{***}
	4	-0.00246	0.58950	0.69681	-1.89280	34.09389	0.867 ^{***}
	5	9.43772	0.48920	16.25544	-	-	0.854 ^{***}

^{***}Significant at $P \leq 0.01$.

상추의 적산 일사량과 생체중 증가에 따른 각 양분의 흡수량을 회귀 분석하였다. 선별된 회귀식을 Table 2-86에, 그리고 각 변수의 계수들을 Table 2-87, 88, 89 및 20에 나타내었다. 각 원소별로 회귀 계수는 0.8 이상의 높은 신뢰도를 나타내었으며, Eq. 9에 나타난 바와 같이 생육일수(DT), 당일까지 누적 적산 일사량(PPFn), 측정 전 2일간의 누적일사량(PPFPn) 및 생체중(FWn)을 설명변수로 하는 것이 K, Ca, Mg 및 P의 흡수량을 예측하는데 적합한 것으로 나타났다.

Table 2-84. The equations of relationships between absorption amount of each element (Ael) and environmental factors in leaf lettuce grown at different light intensities.

Equation No.	Equation ^z
6	$a \times DT + b \times FWn + c$
7	$a \times DT + b \times PPFn + c \times FWn + d$
8	$a \times DT + b \times PPFPn + c \times FWn + d$
9	$a \times DT + b \times PPFn + c \times PPFPn + d \times FWn + e$

^z Ael ; Uptake amount of element during 2 days before measuring time (mg),

FWn ; fresh weight on measuring day (g),

PPFn ; cumulative photosynthetic photon flux(PPF) to the day ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$),

DT ; growth period (day),

PPFPn ; cumulative PPF during 2 days before measuring time ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$).

Table 2-85. The coefficients of regression parameter used for prediction of K uptake amount in leaf lettuce grown at different light intensities.

Regression Equation (Eq. No.)	Coefficient					r^2	
	a	b	c	d	e		
Early	6	7.44286	-1.76947	1.56993			0.854 ^{***}
	7	7.44551	0.00072	-1.77298	1.55639		0.854 ^{***}
	8	7.07870	-0.18347	-1.57516	4.43726		0.861 ^{***}
	9	7.01350	0.11143	-0.42446	-1.86624	6.09876	0.870 ^{***}
Later	6	15.11359	-1.22490	27.72370			0.865 ^{***}
	7	16.39996	0.22114	-1.63318	37.99400		0.895 ^{***}
	8	15.97530	0.19587	-1.34426	28.20252		0.871 ^{***}
	9	15.73767	0.31005	-0.26810	-1.63400	41.46780	0.900 ^{***}

^{***}Significant at $P \leq 0.01$.

Table 2-86. The coefficients of regression parameter used for prediction of Ca uptake amount in leaf lettuce grown at different light intensities.

Regression		Coefficient					r ²
Equation	(Eq. No.)	a	b	c	d	e	
Early	8	0.24775	-0.02946	0.01091	0.45228		0.836 ^{***}
	9	0.24405	0.00632	-0.04314	-0.00561	0.54658	0.845 ^{***}
Later	7	3.10446	0.05141	-0.32866	7.44074		0.851 ^{***}
	8	3.09625	0.06611	-0.27403	5.21470		0.824 ^{***}
	9	3.05138	0.05854	-0.02149	-0.32872	7.71913	0.852 ^{***}

^{***}Significant at P ≤ 0.01.

Table 2-87. The coefficients of regression parameter used for prediction of Mg uptake amount in leaf lettuce grown at different light intensities.

Regression		Coefficient					r ²
Equation	(Eq. No.)	a	b	c	d	e	
Early	7	0.75949	0.01545	-0.25455	-0.47618		0.801 ^{***}
	9	0.73352	0.02210	-0.02552	-0.26016	-0.20309	0.807 ^{***}
Later	8	0.09746	-0.00270	0.00050	-0.17195		0.850 ^{***}
	9	0.09695	0.00067	-0.00370	-0.00012	-0.14343	0.852 ^{***}

^{***}Significant at P ≤ 0.01.

Table 2-88. The coefficients of regression parameter used for prediction of P uptake amount in leaf lettuce grown at different light intensities.

Regression		Coefficient					r ²
Equation	(Eq. No.)	a	b	c	d	e	
Early	7	0.81472	-0.00890	-0.14966	-0.36324		0.898 ^{***}
	8	0.79081	-0.02867	-0.16293	-0.08327		0.901 ^{***}
	9	0.79272	-0.00326	-0.02162	-0.15441	-0.13189	0.902 ^{***}
Later	7	0.50077	0.00802	-0.03168	0.30037		0.850 ^{***}
	8	0.48005	0.00590	-0.02047	-0.05780		0.824 ^{***}
	9	0.47082	0.01204	-0.01212	-0.03172	0.45742	0.857 ^{***}

^{***}Significant at P ≤ 0.01.

단 생체중이나 각 원소의 흡수량에 대한 설명변수로 야간의 호흡에 의한 생체중 감소와 생육기간 동안의 적산온도를 포함하지 않았기 때문에 정확한 예측을 위해선 호흡량, 기온, 근권온도, 대기 중 CO₂ 농도 및 상대습도 등의 요인도 고려해야 할 것이다(Albright and Both, 1999).

이상의 결과로 상추의 생체중은 생육일수, 측정전 2일간의 적산일사량 및 누적 적산일사량의 편회귀계수가 1단계에서 각각 0.763^{***}, 0.517^{**} 및 0.851^{***}, 2단계에서 0.750^{***}, 0.410^{NS} 및 0.800^{***}로 생육일수보다는 측정 당일까지의 적산일사량에 의해 좌우되는 것으로 나타나 Eq. 3이 생체중 예측에 적합할 것으로 생각된다. 그리고 생육시기별 양분 흡수 모델은 1단계와 2단계 공히 Eq. 9로 설명이 가능할 것으로 생각된다. 다만 이 모델을 실제 재배에 적용하기 위해서는 광보상점 이하나 광포화점 이상의 광도에서는 생체중이 증가하지 않고 오차만 발생시키므로 적산일사량 산출시 고려해야 할 것으로 생각된다. 생체중 예측시 야간의 호흡량이나 주간 광합성 속도에 대한 정보가 추가되어야 보다 정확한 양수분 흡수 모델을 개발할 수 있을 것이며 기온과 상대습도에 따라 양수분 흡수 특성이 달라지므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

지금까지 실시간 제어를 위한 모델링 연구가 많이 진행되어 왔는데, 환경요인별로 생육에 미치는 영향은 작물별로 차이가 있어 Mankin과 Fynn(1996)은 New Guinea impatiens에서는 9시간의 광주기동안 각 이온의 흡수는 온도보다 PPF에 상관을 보였고, 장기간 흡수는 수관면적, 엽면적이나 건물중과 상관있다고 보고하여 보다 밀접하게 관련된 환경인자를 밝히는 것이 중요할 것으로 생각된다. 또한 세포단계에서 전 식물체 수준까지 수분흡수와 이용 및 대사과정(Jones and Tardieu, 1998), 양액흡수와 생육(Bot et. al., 1998), 광합성 및 대사(Marcelis et. al., 1998) 등 많은 모델링이 개발되었지만 엽면적이나 건물중 및 광합성 등의 자료가 있어야 예측이 가능한 것이 대부분이라 실제 재배에 적용하기에 무리가 많은 것으로 생각된다. 따라서 현장에서 쉽게 얻을 수 있는 생체정보를 이용하여 보다 간단하고 정확하게 식물의 성장을 예측하는 모델이 필요하며, 몇 개체의 생체중과 환경 정보만으로 작물의 양수분 흡수량을 예측하고, 이를 토대로 생육에 최적인 양액조성을 일정하게 유지할 수 있을 것이다.

3. 적요

가. 일장 및 재배시기가 양액재배 미나리의 생육 및 품질에 미치는 영향

미나리 수경재배시 계절별 품질 변화를 알아보기 위해 매월 일정시기에 채취하여 엽록소와 ascorbic acid 함량을 살펴보았다. 엽록소 함량은 계절에 따라 상이하게 나타났는데, 기온이 높고 생육이 대체로 빠른 여름~가을에 낮았으며, a/b의 비율은 겨울에 높게 나타났다. Total ascorbic acid 함량도 광합성이 활발한 시기인 여름~가을에 높게 나와 엽록소 함량과 유사하게 나타났으며, 줄기나 엽병 부위보다는 잎에서 상당히 높아 주로 엽병을 생식하는 논재배보다 품질이 우수할 것으로 생각된다.

미나리의 품질을 높이기 위해 적정 야간 진조 방법을 구명한 바, 엽록소 함량은 대체로 16시간 일장에서 높았으나 ascorbic acid 함량은 오히려 자연일장에 높게 나타나 광합성이 활발하지 못한 광도에서는 호흡량이 증가하는 등 오히려 품질에 좋지 않은 것으로 보인다.

나. 적산일사량과 일수에 따른 상추와 미나리의 생육특성

수확시 상추와 미나리의 생육을 예측하기 위해서 시기별 생육양상을 조사하였던 바, 적산 일사량에 대한 각 생육요소는 결정계수가 0.9 이상으로 상당히 높았으며, 이 모델을 통하여 환경요인의 실시간 계측에 따른 생육량을 충분히 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

적산일사량에 따른 생육을 보면 미나리의 경우 생체중과 건물중은 적산일사량 $120 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 부근에서 꼭점을 가지는 것으로 나타났다. 이는 생육 증기를 중심으로 그 변화양상이 현저히 다르다는 사실을 나타내는 것이며 이후 양수분 흡수 특성도 달라짐을 의미한다. 또한 각 시기별 생체중 및 건물중의 증가량은 전일의 일사량에 따라 크게 달라져 당일의 일사량 뿐만 아니라 전일의 일사량도 크게 관

여하고 있음을 알 수 있다.

상추에서도 미나리보다는 생육이 빨라 생체중·건물중 모두 $100\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ 부근에서 꼭점을 가지는 것으로 나타났으며, 일사량에 대한 생육증가폭은 미나리와 유사한 반응을 보였다.

다. 생육단계에 따른 미나리와 상추의 양수분 흡수 특성과 생육

생육 시기별로 양수분 흡수 특성이 다른 것으로 나타나 각 단계별로 양액조성을 구하고자 simple lattice design에 따라 세 원소(K, Ca 및 Mg)를 격자 배치하여 단계별로 생육이 적합한 조성을 구하였다.

공급한 각 양이온의 비율은 K 0.25~0.70, Ca 0.25~0.70 및 Mg 0.05~0.30이었던 바, 미나리의 생육에 적합한 양액조성은 이온간의 비율이 전기에 K 0.475, Ca 0.475 및 Mg 0.05이었고 후기에 K 0.47, Ca 0.40 및 Mg 0.13이었다. K과 Ca이 동량 또는 K의 비율이 약간 높은 조성에서 생육이 양호할 것으로 생각되며, 상대적으로 Ca이 K보다 높은 비율에서는 생육이 열악하였다.

상추에서는 이온 비율이 전기에 K 0.45, Ca 0.25 및 Mg 0.30에서, 후기에 K 0.70, Ca 0.25 및 Mg 0.05에서 생육이 우수하였으며, 미나리와 유사하게 Ca보다 K의 비율이 높은 조성에서 생육이 양호하고 Ca의 비율이 높을수록 생육에 불리하였다.

양액의 농도 변화에서도 생육이 양호한 조성에서 수분보다 양분 흡수량이 증가하여 생육기간동안 갱신이 불가피할 것으로 판단되며, 각 단계별로 생육이 양호한 조성으로 농도를 일정하게 유지시키면 생육이 양호할 것으로 생각된다.

따라서 미나리와 상추 모두 양수분 흡수 특성이 다르게 나타났고, 적산일사량에 따라 생육전기와 후기 2단계로 구분할 수 있고, 각 단계별로 적합한 양액조성이 존재함을 확인할 수 있었다.

라. 적산일사량에 따른 상추의 생육 모델링과 적합한 양액조성 개발

상추의 생육이 적산일사량과 생육일수에 따라 영향을 받는 것으로 나타나 각 적산일사량별로 양수분 흡수량상을 알아보고자 온도가 일정하게 유지되는 하우스에서 인공광 및 자연광 하에서의 양수분 흡수 특성을 알아보았다.

상추의 생체중이 거의 증가하지 않는 광보상점은 12시간 일장에서 $13.7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 보다 조금 낮은 광도인 것으로 밝혀졌으며, 광도가 증가할수록 생체중도 증가하였다. 그리고 적산일사량에 대한 생체중 증가는 회귀계수가 0.98 이상으로, 광도 실시간 계측에 따른 생체중 증가량을 회귀식을 통해 예측할 수 있는 것으로 밝혀졌다.

상추 생육에 따른 양액내 K과 P 이온 농도는 감소하였고, Ca과 Mg은 약간 증가하거나 일정하게 유지되는 경향이였다. 이는 적산일사량이 높을수록 증가하거나 감소하는 경향이 심화되었고, 낮은 일사량에서는 생육이 거의 이루어지지 않아 농도는 일정하였다. 그리고 생체중 증가량에 대한 양분 흡수 비율은 대체적으로 일정하게 유지되는 경향으로 생체중 증가에 의한 양분 요구도는 비례하는 것으로 나타났다.

적산일사량에 대한 생체중 증가량을 회귀분석한 결과, 계측시의 적산일사량과 계측시기 전 2일간 누적일사량 및 생육일수를 설명변수로 하여 생체중 증가에 대한 예측이 가능하였고, 아래와 같은 모델식이 적용 가능할 것으로 생각된다.

$$FW_n = aPPF_m + bPPF_n + c(DT)^2 + d$$

(여기서, FW_n =측정시의 생체중(g),

PPF_m =측정전 2일간의 누적일사량×정식시부터 측정시점까지의 누적일사량($\text{mol}^2 \cdot \text{m}^{-4}$),

PPF_n =정식시부터 측정일까지 누적일사량($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

DT =생육일수(일),

a, b, c, d=각 요인별 결정상수)

또한 적산일사량과 생체중 증가에 따른 각 양분의 흡수량도 결정계수가 0.8 이상으로 회귀식을 통해 양분 요구도를 예측할 수 있는 것으로 나타났으며, 그 회귀

식은 아래와 같다.

$$A_{el} = aDT + bPPFn + cPPFPn + dFWn + e$$

(여기서, A_{el} =측정시기전 2일간 양분흡수량(g),

DT =생육일수(일),

$PPFn$ =정식시부터 측정일까지 누적일사량($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

$PPFPn$ =측정전 2일간의 누적일사량($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

FWn =측정시의 생체중(g),

a, b, c, d, e=각 요인별 결정상수)

따라서 이와 같은 회귀식을 생육제어 프로그램에 적용하게 되면 각 생육일수별로 수집된 적산일사량과 생체중을 토대로 양분 흡수량을 추정할 수 있게 되어 각 시기에 적합한 양액공급이 가능하게 되고, 생육에 적합한 양액을 생육기간 동안 계속 요구량에 맞게 유지함으로써 고품질의 상추 생산이 가능할 것으로 생각된다.

제 3 장 식물공장용 재배식물의 최적배양액 관리 시스템 개발

제 1 절 식물공장 엽채류 및 과채류 최적배양액 개발

1. 재료 및 방법

가. 식물공장 엽채류 최적 근권환경

1) 식물공장용 잎상추 및 반결구 상추 배양액 개발

본 실험에서는 잎상추 품종중 딱섬 적축면 (*Lactuca sativa* cv. Dduksu mjoukchukmoon)과 반결구 상추 품종중 Omega (*Lactuca sativa* cv. Omega)를 공시품종으로 하여 1996년 5월부터 1996년 7월까지 서울시립대학교 유리온실에서 수행하였다. 과종은 두 품종을 1996년 5월 2일에 폴리우레탄 스폰지에 하였고 떡잎이 나올 때까지 물만 공급하였다. 육묘가 끝난 묘를 5월 17일에 NFT베드에 가식하여 일본 원예시험장배양액 ($\text{NO}_3\text{-N}$ 16.0, $\text{NH}_4\text{-N}$ 1.3, $\text{PO}_4\text{-P}$ 4.0, K 8.0, Ca 8.0, Mg 4.0 $\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$)의 표준액을 1/2배액으로 재배하였다. 6월 2일에 본 실험을 위해 적당한 크기로 만든 NFT (Nutrient Film Technique)방식의 베드 (40×120×15 cm)위에 각각 12주씩 정식하였으며 배액구 쪽에 15 l의 급배액 용기를 설치하였고 일정한 시간동안 식물이 흡수한 양을 측정하기 위해 용기 안쪽에 눈금자를 부착하였다.

또한 각각의 용기 안에 30W 용량의 수중전기 펌프를 설치하여 배양액이 순환되도록 하고 급액은 time clock을 이용하여 조절하였다. 두 품종의 상추에 적합한 배양액의 조성 및 농도를 알아보기 위하여 일본 야채 시험장 표준배양액을 1/2, 1,

2배액의 수준으로 하여 10일동안 양수분흡수율 (n/w)을 측정 하였다 (山崎, 1984).

양수분흡수율 (n/w) 계산법은 재배용기로 부터의 수분 감소량인 $w(\ell)$ 는 용기내의 배양액 전량 (a)과 측정 때 잔량의 용량차로 측정하였고 배양액내 각 양분의 흡수량인 n ($me \cdot L^{-1}$)은 처음의 처리 농도 (y)와 a 가 줄어들 때의 농도 (y_1)로 측정하였다. 양수분 흡수율인 n/w 은 y 가 y_1 보다 크면 「 $a/w (y-y_1) + y_1$ 」을 이용하여 계산하고 y 가 y_1 보다 작으면 「 $y_1 - a/w (y_1-y)$ 」을 이용하여 계산하여 다량원소를 조성하였다. 또한 미량원소와 관련하여 다량원소사이의 비율은 아주 중요하는데 그 중 아연과인은 철의 흡수를 방해한다고 하여 배양액 개발을 할 때 사용한 수돗물의 수질분석을 하였다. 새롭게 조성한 배양액의 무기성분의 양은 수돗물의 무기성분과 비교하여 고려하였는데 다른 것은 문제가 되지 않았으나 아연의 양은 사용한 수돗물에 식물체가 필요로 하는 양만큼 있었기 때문에 아연의 양은 첨가하지 않았다.

정식 후부터 용기내 배양액의 EC와 pH를 측정하였으며 EC는 자동 EC 조절기 (CETW-300T, kawamoto)로, pH는 자동 pH 조절기(PET-300A, kawamoto)로 측정하였고 모든 배양액에서 pH는 5.8 ± 6.2 로 조절하였다. 식물체가 흡수한 배양액은 용기 안쪽에 부착해 둔 눈금자의 수위차로 측정하였다. 또한 식물체가 흡수한 배양액 량을 측정한 다음 줄어든 양만큼을 같은 농도로 조성하여 배양액을 각각 공급하였다. 배양액 분석은 200 ml정도씩 채취하여 NO. 2 여과지로 걸러서 무기성분들을 분석하였고 식물체 분석은 지상부와 지하부로 구분하여 풍건 건조기에 넣어 70 °C에서 완전히 건조시킨 후 마쇄하여 분석시료로 준비하였다. 식물체 내 전 질소는 시료를 0.5 g씩 평량하여 Conc. H_2SO_4 10 ml씩을 가하고 분해촉진제 ($CuSO_4 : K_2SO_4 = 1 : 9$)를 넣고 360 °C에서 2시간 동안 분해한 후 질소 증류기(Buchi 323)로 자동 증류한 후 0.005 N H_2SO_4 으로 적정하여 건물중 100 g에 대한 g으로 환산하였다. 식물체 및 배양액의 인산은 vanadate법으로 470nm에서 비색계(Shimadzu UV 2100)를 사용하여 측정하였고 칼슘, 칼륨, 마그네슘 함량은 시료를 0.5 g씩 평량하여 ternaly solution ($HNO_3 : H_2SO_4 : HClO_4 = 10 : 1 : 4$)을 10 ml씩 가하여 350 °C에서 6~7시간동안 분해한 후 원자흡광도계(Perkin Elmer 3100)를 사용하여 측정하였다. 식물체 잎의 광합성속도는 맑은 날 오전 10시부터

12시 사이에 휴대용 광합성측정기(LI-6200, li-cor)를 이용하였다. 식물의 생육을 알아보기 위하여 엽수, 엽장, 엽폭, 지상부와 지하부 생체중과 건물중을 조사하였다.

-개발 배양액의 적합성 평가

잎상추와 반결구 상추의 양수분 흡수율에 따라 조성된 서울 시립대학교 상추 순환식 배양액 (SCU)의 적합성 여부를 알아보기 위하여 기존의 배양액과 비교실험을 실시하였다. 잎상추는 1996년 11월 2일에 파종하여 12월 23일에 NFT베드에 정식하였고 반결구 상추 배양액은 1997년 1월 5일에 파종하여 2월 10일에 정식하였다. 두 품종에 사용한 배양액은 일본의 Yamazaki 배양액, 화란 온실 작물연구소 (PTG)배양액, 식물체의 무기성분에 의해 조성된 (PL)배양액과 새롭게 조성된 서울 시립대 (SCU)배양액이고 반결구 상추는 유럽품종이므로 높은 EC농도에서도 잘 자랄 수 있다고 가정하고 SCU액의 농도를 2S을 하나 더 첨가하였다. 각 배양액의 무기성분 조성은 Table 3-1, 2와 같다.

Table 3-1. The nutrient solutions by n/w value, plant analysis, Yamazaki and PTG in leaf lettuce(unit : me · L⁻¹)

Nutrient solution ^z	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S	A/C ^y	Total conc.
SCU	10.6	1.1	2.0	6.7	3.5	2.0	2.0	1.10	27.9
PL	12.7	1.7	4.2	9.4	3.0	2.0	2.0	1.25	35.0
Yamazaki	8.0	1.0	3.0	6.0	2.0	1.5	1.5	1.19	23.0
PTG	19.0	1.25	6.0	11.0	9.0	2.0	2.3	1.17	50.5

^zSCU : nutrient solution devised by the Seoul City University, PL : nutrient solution devised by the plant analysis. Yamazaki : nutrient solution optimized for lettuce by Yamazaki, PTG : nutrient solution optimized for lettuce by Sonneveld.

^yA : Anion (NO₃-N + PO₄-P + SO₄-S), C : Cation (NH₄-N + K + Ca + Mg)

Table 3-2. The nutrient solutions by n/w value, plant analysis, Yamazaki, and PTG in butterhead lettuce(unit : me · L⁻¹)

Nutrient solution ²	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S	A/C ^y	Total conc.
SCU	9.8	1.0	2.0	6.5	3.0	2.0	2.0	1.10	26.3
PL	10.04	1.14	2.7	7.4	2.4	2.0	2.0	1.14	23.7
Yamazaki	8.0	1.0	3.0	6.0	2.0	1.5	1.5	1.19	23.0
PTG	19.0	1.25	6.0	11.0	9.0	2.0	2.25	1.17	50.5

²SCU:nutrient solution devised by the Seoul City University. PL:nutrient solution devised by the plant analysis. Yamazaki:nutrient solution optimized for lettuce by Yamazaki. PTG:nutrient solution optimized for lettuce by Sonneveld.

^yA:Anion (NO₃-N + PO₄-P + SO₄-S), C : Cation (NH₄-N + K + Ca + Mg)

잎상추 배양액 1S의 각 전기전도도는 SCU액은 1.5 mS·cm⁻¹, PL액은 2.0 mS·cm⁻¹, Yamazaki액은 1.3 mS·cm⁻¹, PTG액은 3.0 mS·cm⁻¹ 이고 반결구 상추배양액의 1S의 각 EC수치는 SCU액은 1.5 mS·cm⁻¹, PL액과 Yamazaki액은 1.3 mS·cm⁻¹, PTG액은 3.0 mS·cm⁻¹ 이었다. 정식 후부터 매일 배양액의 pH, EC 및 흡수량을 측정하였고 2일 간격으로 NaOH와 H₂SO₄을 이용하여 pH를 5.8~6.2로 보정하여 주었다. 배양액의 EC는 자동 EC 조절기 (CETW-300T, kawamoto)로, pH는 자동 pH 조절기 (PET-300A, kawamoto)로 측정하였다. 배양액내의 무기성분 변화를 관찰하기 위해서 실험이 끝날 때까지는 배양액을 교체하지 않았으며 1주일 단위로 생육조사를 실시하였다.

2) 식물공장용 엔다이브 배양액 개발

본 연구는 서울시립대학교 환경원예학과 유리온실에서 수행하였으며, 배양액 조성에 사용된 품종은 Number Five 2-Stratego(네덜란드, Rijk Zwaan)였다. 1996년 5월 3일에 폴리우레탄스폰지에 파종하여 일정 기간동안 1/2배 농도의 日本野試液

을 공급해 재배한 후, 7월 12일에 정식하였다. 작물은 120(L)×40(W)×15cm(H)규격의 NFT 베드를 제작하여 재배하였다. 배양액은 日本野試液의 1/2, 1 및 3/2배 농도로 조제하였고, pH는 6.0±0.2로 보정한 후 EC와 pH의 경시적 변화를 1주일 동안 매일 계측하였다. 그리고 엔디브를 스티로폼 정식판에 12개체씩 정식하여 1주일 동안 양수분 흡수율(n/w)을 측정하였다. 가장 생육이 좋은 배양액에서 계산된 양수분흡수율을 가지고 배양액을 조성하였다.

양수분 흡수율 방식으로 새로 조성한 배양액과 기존 배양액간의 비교실험에 사용한 엔디브는 16품종으로 1996년 7월 5일 폴리우레탄스폰지에 파종하여 7월 24일에 정식하였다. 배양액은 유럽의 엔디브액(PTG, 1992)과 본 연구에서 조성된 양수분 흡수율 수치의 1배액을 기준으로 하여 조성하였으며, 1배액은 시립대액(SCUE)이라고 명명하였다. 그리고 SCUE액을 다시 3수준의 농도(1/2, 1, 2배)로 조성하여 실험하였다. 각 배양액의 1배액을 기준으로 조성하였으며, 1주일동안 pH와 EC 변화를 살펴본 후, 3일 간격으로 pH와 EC를 자동보정하여 주었다. 실험이 끝날 때까지 배양액은 교체하지 않았으며, 1주일 간격으로 생육을 조사하였다.

3) 식물공장용 치커리 배양액 개발

본 실험에 사용한 공시작물은 치커리로서 Radicchio 품종을 사용하였다. 배양액 개발은 일본 원시액을 3수준의 농도(1/2, 1, 2배액)로 조성하였으며 완전 임의배치 2반복으로 하였다. 양수분흡수율(n/w)은 山崎(1982)의 법에 따라 계산하였으며 배양액과 식물체 분석은 AOAC(1995)방법에 따라 하였다. 또 정상적인 생육을 한 식물체를 분석하여 조성한 배양액과 비교할 수 있도록 분석자료에 근거한 배양액도 조성하였다. 배양액 개발실험은 1995년 7월 12일 정식하여 실험을 실시하였다. 양수분흡수율 방식에 따라 조성한 치커리 배양액과 기존의 유럽 엔디브액(Sonneveld, 1992)과의 비교실험을 1996년 9월 16에 정식하여 수행하였다.

4) 식물공장용 덜 배양액 개발

덜 배양액 개발 실험은 수경재배에서 작물의 양수분 흡수패턴을 밝히고 덜의 생육 및 품질에 적합한 배양액을 개발하고자 수행하였다.

공시작물로는 dill(*Anethum graveolens* L. cv. Sari)을 사용하였고 NFT시스템으로 서울시립대학교 유리온실에서 재배하였다. 덜은 1996년 11월 8일에 광조건하에서 petri-dish에 종자를 파종하여 25℃의 항온기에 넣어 최아시킨후 11월 11일 폴리우레탄 스폰지에 이식하였고 NFT 시스템 하에서 육묘하였다. 육묘가 자라는 동안 25℃/주간과 19℃/야간의 조건에서 일본야채시험장 배양액으로 pH 5.8~6.3, EC 1.2~1.5 mS/cm로 공급하여 재배한 후 1997년 1월 4일에 정식 하였다.

덜의 수경재배에 적합한 조성 및 농도를 알아보기 위하여 배양액은 일본 야채시험장 표준액(야시액: NO₃-N 16.0, NH₄-N 1.3, PO₄-P 4.0, K 8.0, Ca 8.0, Mg 4.0 me · L⁻¹)을 1/4배액(1/4 strength : 1/4 S), 1/2배액(1/2 S), 1배액(1 S)으로 조성하여 수행하였다. 재배베드[40(폭)×120(길이)×15(높이)]는 스티로폼 성형제품을 사용하였고, 베드는 배액구쪽에 20 l의 급배액 용기를 설치한 후 30 W 용량의 수중전기펌프를 사용하여 배양액을 순환시켰다. 용기 내부의 한쪽면에는 눈금자를 부착하여 눈금의 수위 차로써 식물체가 흡수한 양을 측정하였다. 그리고 식물이 흡수한 양만큼 양액을 보충해 주고 시료 양액은 1주마다 채취하여 여과지로 걸러서 분석하였다.

덜은 베드당 12개체를 정식하여 EC와 pH의 변화를 측정하고 1주일 간격으로 양수분 흡수율(n/w)을 측정하였다. 양수분 흡수율은 Yamasaki 공식에 따라 계산하였다(山崎, 1981).

정식 후부터 용기내 배양액의 pH는 pH meter(TOA, HM-20E)로, EC는 EC meter(TOA, CM-20E)로 매일 측정하였으며, pH교정은 KOH와 H₂SO₄로 하였다.

배양액과 식물체내 무기성분들을 조사하기 위하여 배양액과 식물체를 주기적으로 분석을 실시하였다. 식물체는 생육기간중 수확 채취하여 생육 및 수량을 조사하고 식물체 각 부위로 나누어 건조기에 넣어 65℃에서 완전히 건조시킨 다음, 분쇄하여 분석시료로 준비하였다. 생육조사 항목은 엽수, 분지수, 줄기직경, 지상부와

지하부의 생체중과 건물중을 조사하였다.

식물체내 질소 함량을 측정하기 위하여 분쇄된 시료를 0.5g씩 칭량하여 kjeldahl flask에 넣고 분해촉진제($\text{CuSO}_4 : \text{K}_2\text{SO}_4 = 1 : 9$) 5g과 농황산 10ml를 가하여 분해조에서 230℃로 2시간 동안 분해하였다. 분해액은 질소자동증류기(Büchi 323)로 증류하여 0.005N- H_2SO_4 로 적정하여 전질소함량을 측정하였다(Bremner, 1965). 질소 이외의 인산, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 함량을 측정하기 위하여 시료 0.5g을 칭량하여 100ml삼각 플라스크에 넣고 ternary solution($\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4 : \text{HClO}_4 = 10 : 1 : 4$) 을 10ml를 가하여 230℃ 전열판에서 2시간 분해하였다. 준비된 분해액 및 여과지로 걸러 희석한 배양액은 분석기기를 이용하여 정량하였는데 인산은 vanadate법으로 470nm에서 비색계(UV 2100, Shimadzu)를 사용하여 비색 정량하였다. 배양액 무기성분중 Cl^- , SO_4^{2-} 등의 음이온은 이온크로마토그래피(ICDX-100, Dionex)를 사용하여 분석하였으며 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등의 양이온은 원자흡광광도계(Perkin Elmer 3100)를 사용하여 정량한 후 건물중에 대한 백분율(%)로 환산하였다.

-개발 배양액의 적합성 검정

딜의 양수분흡수율에 따라 조성한 서울시립대 배양액(SCU)의 적합성을 검정하기 위해 기존의 허브 배양액으로 사용된 배양액인 일본야채시험장(National Horticultural Research Station in Japan; HRS)과 비교실험을 수행하였다. 실험에 사용된 배양액은 일본야채시험장 표준액(HES) 1/2배액과 개발된 시립대 배양액(SCU)을 3가지 수준의 농도(1/4S, 1/2S, 1S)로 조성하여 수행하였다. 각 배양액의 무기성분 조성은 표 5와 같다.

공시작물로는 dill(*Anethum graveolens* L. cv. Sari)을 사용하였으며 1997년 2월 20일에 광조건하에서 petri-dish에 파종하여 25℃ 항온기에서 최아시킨후 우레탄 스폰지에 이식하였다. 최아된 종자는 NFT재배베드에 이식하여 일본야채시험장 배양액으로 pH 5.8~6.0, EC 1.2~1.5 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 로 공급하여 육묘하여 97년 1월 4일에 정식하였다.

정식후 2일 간격으로 배양액내 pH와 EC 및 배양액량을 측정하였다. pH는 자동 pH조절기(PET-300A)를 사용하여 모든 배양액에서 $\text{pH}6.0\pm 0.1$ 로 보정하였다. EC

는 자동 EC조절기(CETW-300T)를 사용하여 HES 배양액은 1.20 mS/cm (1/2 S), SCU 배양액은 0.85 mS/cm (1/2 S), 1.30 ms/cm(1 S), 1.83 mS/cm (3/2 S) 및 2.4 mS/cm (2S)으로 조절하였다. 식물체가 흡수한 배양액량을 측정된 다음 줄어든 양만큼 물을 다시 채우고 공급한 물양에 해당하는 양만큼 배양액의 원액을 공급하였다.

배양액내 무기 성분들의 농도변화를 조사하기 위하여 매주 순차적으로 채취하여 분석시료를 준비하였다. 또한 정식 3주후 생육과 수량을 조사하고 각 부위별 식물체내 무기성분 흡수 상태를 보기위해 식물체 시료를 채취하였다. 배양액 무기 성분중 NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} 등의 음이온은 이온크로마토그래피(ICDX-100, Dionex)로 측정하였으며, 그외 식물체와 배양액내 무기성분 분석 방법은 달의 배양액 개발 실험과 동일하게 수행하였다.

5) 식물공장용 바실 배양액 개발

바실의 배양액 개발은 순환식 양액재배에 적합한 배양액을 조성 하기위해 일본 야채시험장 배양액을 사용하여 수행하였다. 배양액은 일본야채시험장액을 1/4배액(1/4 strength : 1/4 S), 1/2배액(1/2 S), 1배액(1 S), 2배액(2 S)의 4가지 수준의 농도로 조성하여 수행하였고 양수분흡수율은 n/w방법에 따라 계산하였다(山崎, 1981).

공시작물로는 sweet basil(*Ocimum basilicum* L.)을 사용하였으며 1997년 1월 23일에 종자를 petri-dish에 넣어 광조건하의 25℃ 항온기에서 최아시켰다. 최아시킨 종자는 우레탄스폰지에 이식하여 NFT시스템하에서 일본야채시험장 배양액으로 육묘하여 3월 18일에 정식하였다.

정식후 뿌리의 활착이 완료되기까지 일주일간 순화시킨 후 용기내 배양액의 pH와 EC의 변화를 매일 측정하였다. 배양액의 pH는 자동pH조절기(PET-300A)를 사용하여 모든 배양액에서 pH 6.0±0.1로 보정하였다. EC는 자동EC조절기(CETW-300T)를 사용하여 측정하였으며 일주일 간격으로 양수분 흡수율(n/w)을 측정하였다. 배양액은 식물이 흡수한 양만큼 양액을 보충해 주고 시료 양액은 일

주일마다 채취하여 여과지로 걸러 분석하였다.

식물체는 생육기간중 수회 채취하여 엽수, 최대엽장, 최대엽폭, 지상부와 지하부의 생체중·건물중 등을 조사하였다. 바실 잎의 광합성속도와 기공저항 등은 휴대용 광합성 측정기(LI-6200, Licor)를 사용하여 측정하였다. 배양액과 식물체내 무기성분 분석은 딜의 배양액 개발 실험과 동일하게 수행하였다.

-개발 배양액의 적합성 검토

배양액 개발 실험을 통해 새롭게 조성된 서울시립대 배양액(SCU)의 적합성 여부를 알아보기 위하여 다른 허브 배양액과의 비교실험을 실시하였다. sweet basil(*Ocimum basilicum* L.)을 공시하였고 1997년 6월 5일에 우레탄스폰지에 파종하였다. 유묘는 NFT 시스템으로 이식하여 일본야채시험장 배양액으로 pH 5.8~6.0, EC 1.2~1.5 mS/cm의 조건하에서 육묘하였으며 7월 7일 정식하였다.

실험에 사용한 배양액은 기존의 허브배양액으로 사용된 일본야채시험장 표준액(HRS), 유럽의 채소연구개발센터에서 개발된 허브전용 배양액(EVR ; NO₃-N 10.1, NH₄-N 0.5, P 5.4, K 5.4, Ca 4.8, Mg 2.1 me·L⁻¹)(Benoit, 1992), 바실의 식물체 분석자료에 기초하여 조성한 배양액(PA; NO₃-N 8.4, NH₄-N 1.2, P 2.4, K 4.5, Ca 3.5, Mg 1.0 me·L⁻¹) 및 바실의 양수분 흡수 특성에 따라 개발한 바실 시립대액(SCU)을 사용하여 NFT방식으로 재배하였다.

각 배양액의 무기성분 조성은 표 12와 같으며 배양액농도는 일본야채시험장 배양액(HES)과 EVR 배양액 및 PA 배양액은 1배액으로 하였으며 SCU 배양액은 1/2배액, 1배액, 2배액의 농도로 하여 실험하였다.

정식후부터 매일 배양액의 pH, EC 및 배양액량을 조절하였으며 배양액의 pH는 자동pH조절기(PET-300A)를 사용하였으며 EC는 자동EC조절기(ETW-300T)를 사용하였다. 배양액내 무기성분들의 농도변화를 조사하기 위하여 매주 순차적으로 배양액을 채취하여 배양액분석을 하였다. 식물체는 생육기간중 수회 채취하여 생육량을 조사하고 식물체의 각 부위로 나누어 65℃에서 건조시킨 후 식물체내 무기성분 분석을 하였다. 광합성 측정은 휴대용 광합성 측정기(LI-COR 6200, Licor)를 사용하여 CO₂동화율과 기공저항 등을 조사하였다. 배양액 및 식물체 분석은 배양액 개발 실험과 동일한 방법으로 실시하였다.

나. 병용형 식물공장의 과채류 최적 근권환경

1) 토마토 순환식 배지경에 적합한 배양액 개발

토마토 순환식 고품배지경용 배양액 개발 실험은 순환식 양액재배에서 생육단계별 작물의 양분 흡수 패턴을 밝히고 최적 배양액을 개발하고자 1995년 7월부터 1995년 12월까지 수행하였다. 공시작물은 완숙계 '감복 토마토(초원종묘)'를 사용하였다.

과종은 1995년 7월 10일에 하였고 이식은 암면포트에 하였다. 시험구 배치는 완전임의 배치 2반복으로 하였다. 실험에 사용한 배지는 펄라이트로써 사용전에 배지내 함유되어 있는 무기양분이 씻겨지도록 충분히 포수시킨 후 8월 24일에 정식하였다. 재배베드(0.4×1.2×0.2m)는 스티로폼 성형제품을 사용하여 1 베드당 3주를 40cm 간격으로 1열로 정식하였으며, 수분증발을 막기 위해 정식 전에 흑백 플라스틱 필름으로 베드를 피복 하였다. 배양액은 각 베드마다 27ℓ의 급배액용기를 설치하고 각각의 용기안에 30 W의 수증펌프를 설치하여 순환시켰다. 식물체의 매일의 흡수량은 배양액통 내부의 한 쪽 면에 눈금자를 부착하여 측정하였다. 급액은 1일 15회 점적관수 하였다.

배양액은 생육단계별로 일본 야채시험장 표준액 (NO₃-N 16.0, NH₄-N 1.3, PO₄-P 4.0, K 8.0, Ca 8.0, Mg 4.0 me · L⁻¹)을 2수준의 농도(1/2 배액, 1배액 농도)로 조성하여 매일 식물이 흡수한 양액의 양만큼의 양액을 공급해주면서 생육단계별로 양수분 흡수율 (n/w), 배양액의 pH와 EC변화, 생육 및 수량을 조사하였다.

양수분 흡수율은 山崎(1982)방법에 따라 계산하였으며 양액분석은 200ml정도씩 채취하여 분석하였다. 식물체 및 배양액내 질소는 질소분해장치 및 자동증류기(Büchi 323)로 측정하였고 식물체 및 배양액내 인산은 vanadate법으로 비색계(Shimadzu UV 2100)로 측정하였다. 식물체의 칼슘, 칼리, 마그네슘 함량은 분해한 후 원자흡광광도계(Perkin Elmer 3100)를 사용하여 측정하고, 배양액은 그대로 걸

러서 회석시켜 측정하였다. 과실의 당도는 당도계(Atago, N1)로 측정하였고 당산비는 NaOH량에 따른 citric acid 함량을 구하여 계산하였다. 생육조사는 엽장, 엽폭, 초장, 경경을 조사하였고, 생체중을 측정한 후 건조기에 넣어 65℃에서 72시간 건조시켜 건물중을 측정하였다. 근권내 배양액의 pH는 pH 미터기(TOA, HM-20E), 전기전도도는 EC 미터기(TOA, CM-20E)를 이용하여 측정하였다.

-개발 배양액의 적합성 평가

고형배지경에서 생육단계별로 양수분 흡수율에 따라 조성된 서울시립대 토마토 순환식 배양액(SCUT)의 적합성 여부를 알아보기 위하여 기존의 다른 토마토 배양액의 하나인 네델란드 온실작물연구소의 순환식 배양액(PBG)을 사용하여 비교 실험을 실시하였다. 공시작물은 '감복 토마토(초원종묘)'를 사용하였고 파종은 1996년 4월 18일, 이식은 5월 5일 암면포트에, 정식은 5월 17일에 하였다.

시험구배치는 암면배지를 완전임의 배치 2반복으로 하였고 배양액 농도는 SCUT 배양액과 PBG 배양액을 각각 3수준의 농도 (1/2배액, 1배액, 2배액)로 구분하여 실험하였다. 정식 후부터 매일 배양액의 pH, EC 및 흡수량을 측정하였으며 2일 간격으로 배양액의 pH와 EC를 일정 수준으로 조절해 주었다.

배양액의 pH는 자동 pH조절기 (PET-300A, Kawamoto)를, EC는 자동 EC조절기(Kawamoto, CETW - 300T)를 사용하였다.

실험에 사용된 두 가지 배양액은 펠라이트 배지에서 개발된 서울시립대 토마토 순환식 배양액(SCUT)과 네델란드온실작물연구소 순환식 배양액(PBG)을 사용하였다(Table 3-3).

Table 3-3. The compositions of macronutrient solution in tomato perlite substrate culture developed by Seoul City University and Sonneveld(1993) in close system.

Nutrient solution	Growth stage	N	P	K	Ca	Mg
SCUT ^z	Seedling	13.5	3.3	7.0	7.0	3.5
	Vegetative	14.2	3.3	8.0	7.5	4.0
	Reproductive	10.0	3.0	7.0	6.0	3.0
PBG ^y		11.8	3.5	6.5	5.5	2.0

^zSCUT: nutrient solution of Seoul City University for tomato substrate culture in closed growing system.

^yPBG: nutrient solution of proefstation voor tuinbouw onder glas te Naaldwijk (Sonneveld and Straver, 1992)

전기전도도의 경우 SCUT 배양액과 PBG 배양액 모두 1/2 배액은 1.1 mS/cm , 표준액은 2.1 mS/cm , 2 배액은 3.9 mS/cm로 동일하게 조절하였고, 배양액의 pH 는 모든 배양액에서 H₂SO₄를 이용하여 pH 5.5 ~ 6.0 수준으로 조절하였다.

배양액내 무기성분함량 변화는 배양액을 생육단계별로 4번 채취하여 분석하였다. 배양액 분석 및 식물체 분석은 위의 배양액 개발실험과 동일한 방법으로 실시하였다.

2) 오이 순환식 배지경에 적합한 배양액 개발

‘은성백다다기’ 오이를 공시 재료로 하여 1996년 6월 23일에 혼합 배지가 들어 있는 128공 플러그 트레이에 파종하고, 7월 29일에 오이 묘를 펠라이트와 암면 배지가 들어 있는 베드 (120 cm× 25 cm×14 cm) 위에 각각 3株씩 정식하였으며, 수분 증발을 막기 위하여 정식 전에 흑백 플라스틱 필름으로 베드를 멀칭하였다. 베드는 1/200의 경사를 주었으며 배액구쪽에 20 l의 급배액 용기를 설치하고 용기 안쪽에 눈금자를 부착하여 水位를 측정할 수 있도록 하였다. 또한 각각의 용기 안에 30 W 용량의 수중전기펌프를 설치하여 배양액을 순환식으로 공급하였다. 배양액은 time clock을 이용하여 06:00시부터 20:00시까지 매시간마다 15

분석, 그리고 24:00시에 1회 15분 동안 공급하였다.

오이 순환식 고품배지경에 적합한 조성 및 농도를 알아보기 위하여 일본 야채 시험장 표준액 ($\text{NO}_3\text{-N}$ 16.0, $\text{NH}_4\text{-N}$ 1.3, $\text{PO}_4\text{-P}$ 4.0, K 8.0, Ca 8.0, Mg 4.0 $\text{me}\cdot\ell^{-1}$)을 1/2 배액 (1/2 strength; 1/2 S), 1 배액 (1 S) 및 3/2 배액 (3/2 S)의 수준으로 하여 양수분흡수율 (n/w)을 측정하였다 (山崎, 1984). 우선, 재배 용기로부터의 수분감소량인 w (ℓ)는 용기 내의 배양액 쏠량 (a)과 측정 때의 殘量의 용량 차로 측정하였다. 각 성분의 흡수량인 n ($\text{me}\cdot\ell^{-1}$)은 처음의 처리 농도 (y)와 a 가 줄어든 때의 농도 (y_1)를 측정하였으며, 또한 보충한 액 (w)을 첨가한 a 의 농도 (y)와 다시 a 가 줄어든 때의 농도 (y_1)를 측정하여 계산하였다. 양수분흡수율인 n/w 은 y 가 y_1 보다 크면 「 $a/w(y-y_1)+y_1$ 」을 이용하여 계산하고, y 가 y_1 보다 작으면 「 $y_1-a/w(y_1-y)$ 」을 이용하여 계산하였다 (山崎, 1984). 각각의 농도별로 배양액을 조제할 때는 수돗물 내에 들어 있는 무기 성분들을 배제하기 위하여 증류수를 사용하였다.

정식 후부터 용기내 배양액의 EC와 pH를 매일 측정하였으며 EC는 EC meter (CM-20E, TOA)로, pH는 pH meter (HM-20E, TOA)로 측정하였다. 오이가 흡수한 배양액량은 용기 안쪽에 부착해 둔 눈금자의 수위차로 측정하였다. 또한 식물체가 흡수한 배양액량을 측정한 다음 줄어든 양만큼 증류수를 다시 채우고 공급한 물량에 해당하는 양만큼 배양액의 원액을 계산하여 공급하였다.

배양액과 식물체내 무기 성분들을 조사하기 위하여 배양액과 식물체 분석을 실시하였으며, 분석은 급액농도 제어 실험과 동일한 방법으로 실시하였다.

-개발 배양액의 적합성 검증

‘은성백다다기’ 오이를 공시 재료로 하여 1996년 9월 7일에 위의 실험과 동일한 혼합 배지가 들어 있는 128공 플러그 트레이에 파종하고 9월 23일에 오이 묘를 암면이 들어 있는 베드 (120 cm×25 cm×14 cm) 위에 정식하였다. 위의 실험에서 개발된 배양액의 적합성 여부를 알아보기 위하여 다른 오이 재배용 배양액과의 비교 실험을 실시하였는데 실험에 사용된 배양액은 山崎 배양액, 화란 온실작물연구소 (Proefstation voor tuinbouw onder glas te Naaldwijk; PTG) 배양액, 그리고 본 실험에서 개발된 SCU (Seoul City University) 배양액이었다. 각 배양

액의 무기성분 조성은 결과 및 고찰의 표 22와 같으며 배양액 농도는 山崎 배양액과 PTG 배양액은 1 배액으로 하였으며 SCU 배양액은 1/2 배액, 1 배액 및 3/2 배액으로 구분하여 실험에 사용하였다.

정식 후부터 2일 간격으로 배양액의 EC, pH 및 배양액량을 조절하였으며, 배양액의 EC는 자동 EC 조절기 (CETW-300T, KAWAMOTO)를 이용하였으며 pH는 자동 pH 조절기 (PET-300A, KAWAMOTO)를 이용하여 조절하였다. EC의 경우 山崎 배양액은 $2.05 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-2}$ (1 배액), PTG 배양액은 $1.62 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-2}$ (1 배액), SCU 배양액은 $0.89 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-2}$ (1/2 배액), $1.71 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-2}$ (1 배액) 및 $2.55 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-2}$ (3/2 배액)로 조절하였고 pH는 모든 배양액에서 5.8 ± 0.1 로 조절하였다.

배양액내 무기 성분들의 농도 변화를 조사하기 위하여 9월 23일을 1차로 하여 10월 14일, 10월 23일, 10월 30일, 11월 6일에 순차적으로 채취하였다. 또한 식물체내 무기성분 함량을 조사하기 위하여 식물체 시료를 채취하였다. 배양액 및 식물체 분석은 급액농도 제어 실험과 동일한 방법으로 실시하였다.

2. 결과 및 고찰

가. 식물공장 엽채류 최적 근권환경

1) 식물공장용 잎상추 배양액 개발

잎상추 수경재배에 적합한 배양액을 개발하기 위하여 일본 야채 시험장 표준 배양액 1배액과 두 농도 (1/2, 2 배액)로 잎상추를 재배하여 양수분흡수율을 조사하였다 (Table 3-4).

전 재배기간동안 근권내 무기성분의 함량변화를 보면 $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 1S에서, K는 2S에서 감소하는 경향을 보였고 Ca, Mg는 세처리구에서 모두 증가하였다.

재배기간 동안 근권내 pH와 EC의 변화를 보면 pH는 1/2S에서 대체로 변화폭이 작았으며 EC는 세 농도구에서 모두 안정적이었다. 상추의 생육은 pH와 EC가 전

생육기간동안 안정적이었던 1/2S에서 가장 좋았고 1S, 2S에서는 생육이 감소하였다.

엽채류의 상품성에 가장 큰 영향을 미치는 잎끝마름증 (tipburn) 발생율은 1/2S에서 나타나지 않았고 1S와 2S에서 90%이상이 발생하였다 (Table 3-5).

일반적으로 상추는 새로운 잎이 발육하여 결구를 형성하는 시기에 특히 tipburn 발생에 민감한데 이런 현상은 재배 환경조건에 따라 발생정도가 다르며, 그 증상은 새로 나오는 잎의 가장자리에 수침상의 괴저가 나타난다. 이것은 종종 연부병이 뒤따르게 되어 비상품성의 상추를 생산하게 된다고 보고되었다(G. C. Cresswell, 1995).

또한 이러한 tipburn현상은 칼슘의 국부적인 결핍으로 인한 불균형이 원인이라 할 수 있는데 이것은 첫째, 유엽에 칼슘염을 공급함으로써 증상이 억제되고 둘째, 세포내 칼슘 유용성을 줄이기 위해 ammonium oxalate공급함으로써 증산이 유지되었다 (Thibodeau, Minotti, 1969).

Gofu와 Takakura (1992)는 발육하는 잎주위의 공기흐름을 증가시킴으로써 tipburn을 제어할 수 있다고 보고하였고 Termohlen와 V. D. Hooven (1966)는 tipburn을 다음과 같은 4가지 형태로 분류하였다. ① 건조 잎끝마름증 (dry tipburn) ② 보통 잎끝마름증 (normal tipburn) ③ 엽신 잎끝마름증 (veinal tipburn) ④ 유액 잎끝마름증 (latex tipburn)로 구분하였다.

Table 3-4. Calculated n/w^z value of leaf lettuce based on the Yamazaki's formula.

Nutrient conc.	Measured Items	Water (ℓ)	Measured Items	PO ₄ -P	K	Ca	Mg
1/2 S	a ^x	15.00	y ^w	1.41	3.64	3.73	2.03
	w	8.06	y ₁	1.05	1.22	4.62	2.41
	a / w	1.86	n / w	1.72	5.72	2.97	1.70
S ^y	a	15.00	y	2.65	7.89	7.51	4.04
	w	7.04	y ₁	4.12	7.88	10.33	5.47
	a / w	2.13	n / w	0.99	7.90	4.32	2.42
2 S	a	15.00	y	5.69	15.76	15.46	8.17
	w	7.19	y ₁	3.86	17.27	18.88	10.03
	a / w	2.09	n / w	7.69	14.11	11.73	6.14

^zn/w : The formula devised by Yamasaki to determine the amount of macronutrients and water uptake at regular intervals during water culture.

$$\text{if } y > y_1, n/w = \frac{a}{w} (y - y_1) + y_1 ; y < y_1, n/w = y_1 - \frac{a}{w} (y_1 - y)$$

^yS : The nutrient solution of Horticultural Experiment Station in Japan.

^xa : Initial volume of culture solution in each tray.

^ww : The amount of water absorbed by plant

^yy : The initial concentration of macronutrients in culture solution.

y₁ : The final concentration of macronutrients in culture solution.

Table 3-5. Effect of the nutrient solution strength in leaf lettuce growth at 10 days after transplanting

Nutrient strength ^z	Tipburn (%)	No. of leaves (each)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
					Shoot	Root	Shoot	Root
1/2S	0	13.4	23.28 a ^y	23.8 a	125.16 a	16.67 ab	5.13	0.590
1S	91.7	14.0	20.66 b	20.10 b	100.77 ab	18.51 a	5.12	0.806
2S	100	13.2	20.36 b	20.16 b	77.40 b	13.70 b	5.08	0.738

^z: The nutrient solution of Horticultural Experiment Station in Japan.

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

위 보고들의 결과로 보아 엽채류의 tipburn은 상품성에 결정적인 영향을 미치므로 최대한 발생되지 않도록 지상부환경과 근권환경을 조절해주어야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험의 1, 2S 처리구에서는 tipburn 발생율이 90%이상 나타났으므로 이 처리구의 양수분흡수율을 배양액개발의 기초자료로 사용할 수 없었다.

이상의 결과로 일본 야채 시험장배양액으로 양수분흡수율 (n/w)을 살펴본 실험에서는 EC, pH (data로 나타내지 않음)가 안정적이고 생육이 가장 우수하였으며 tipburn발생이 나타나지 않았던 1/2S에서의 양수분흡수율 (n/w)을 택하여 새로운 배양액의 기초자료로 하였다.

-개발배양액의 적합성 검증

새로 조성한 잎상추 배양액이 실제 재배에 적합성의 여부를 알아보기 위하여 기존에 활용되던 상추배양액과 비교 실험하였다.

기존 배양액은 화란온실작물연구소에서 개발한 상추전용 순환식 (Proefstat ion voor Tuinbouw onder Glas te naaldwijk : PTG)배양액, 일본의 山崎 상추배양액 과 잎상추를 분석하여 얻은 자료를 기초로 조성한 배양액 (Plant analysis : PL)을 사용하였고 각 배양액의 무기성분 조성은 Table 3-1과 같다.

전 재배기간동안의 근권내 pH와 EC변화 (Fig. 3-1, 3-2)를 조사한 결과, pH는 모든 배양액에서 생육초기에는 하강하다가 7일 이후부터는 다소 안정적인 경향을 보였다.

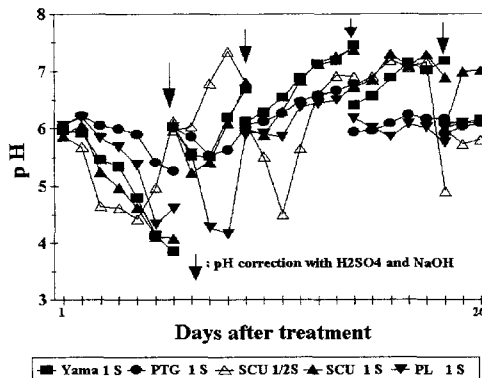


Fig 3-1. Changes of pH in root zone based on the different nutrient solutions for leaf lettuce.

그 이유는 Ikeda (1981)가 배양액내 NH_4^+ 이온이 우선적으로 흡수되면서 일시적으로 pH가 감소되고 이렇게 우선적으로 NH_4^+ 이온의 흡수가 이루어지고 나면 NO_3^- 를 비롯한 음이온 흡수가 지속적으로 이루어지면서 pH가 상승하게 된다고 하였다.

EC는 대체로 안정적이었으나 PTG액은 유럽에서 주로 사용되는 반결구상추 배양액이라 EC가 $3.0 \text{ me}\cdot\text{L}^{-1}$ 정도여서 배양액의 농도가 다른 배양액보다 월등히 높았고 후기로 갈수록 높아지는 경향을 보였다.

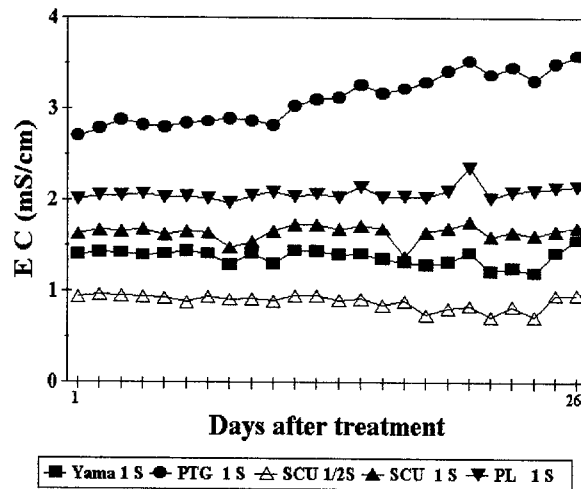


Fig 3-2. Changes of EC in root zone based on the different nutrient solutions for leaf lettuce.

또한 배양액 내에 축적된 $\text{K} + \text{Ca} + \text{Mg} / \text{N} + \text{P} + \text{S}$ 의 비가 1 내외인데 그 의미는 양이온이 음이온보다 많이 흡수되기 때문에 pH가 낮아진다는 것을 나타내고 있고 생육은 점차 후기로 가면서 무기이온의 흡수가 균형을 이루어 안정되어 갔다. 배양액 종류와 농도 차이에 따른 엽장, 엽수, 생체중이 SCU액 1S에서 가장 높았으며 PTG액 1S에서 생체중이 가장 낮게 나타났다 (Table 3-6).

배양액 종류별로 생육조사 결과, 상추의 엽수, 엽장, 엽폭의 세 가지 처리간에는 유의차가 없었지만 전체적인 면에서는 SCU액 1S에서 가장 높았으며 다음으로 Yamazaki액에서 높게 나타났으나 다른 두 배양액에서는 생체중이 적었다. 그 외 성장요소 중 엽폭, 엽장은 처리간의 차이를 거의 보이지 않았다 (Table 3-6).

Table 3-6. Growth of leaf lettuce on the nutrient solutions at 25 days after transplanting.

Nutrient solution ^z	Nutrient conc.	No. of leaves (each)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
					Shoot	Root	Shoot	Root
SCU	1/2S	10.3	21.4 b ^y	18.9 ab	71.1 b	12.4	3.6 b	0.84
	1S	12.3	24.5 a	23.1 a	95.1 a	13.9	4.8 a	0.81
PL	1S	11.3	24.1 a	18.6 b	73.4 b	12.6	3.8 b	0.87
Yamazaki	1S	10.7	23.6 ab	19.8 ab	76.5 ab	12.4	3.8 b	0.79
PTG	1S	10.0	22.6 ab	23.0 a	69.1 b	12.6	3.4 b	0.78

^zSee the table 3-1.

^yMeans separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

각 처리별로 엽내 무기성분을 1985년부터 1995년동안 상추엽내 무기성분 함량을 분석한 결과를 종합하여 만든 자료로 만든 서울시립대학 상추의 영양진단 기준 (Table 3-7)에 따라 엽내 적정 무기성분 함량을 비교하였던 결과, 엽내 N, P, K, Ca 및 Mg의 함량은 SCU액 1/2S에서 가장 낮았으나 육안으로 결핍을 확인할 수 있는 어떤 징후도 발견하지 못 하였다.

Table 3-7. Nutrient contents of leaf lettuce grown under different nutrient solutions and nutrient concentrations.

Nutrient solution ^z	Nutrient conc	Nutrient content (%)				
		N	P	K	Ca	Mg
SCU	1/2S	3.79	0.43	1.36	1.01	0.36
	1S	5.12	0.72	2.77	1.12	0.56
Yamazaki	1S	4.67	0.57	2.98	1.62	0.39
PTG	1S	5.19	0.67	3.21	3.10	0.78

^zSee the table 3-1.

또한 1/2S액을 제외한 세가지 배양액에서는 N, P, Mg는 적정수준을 나타내었고, Yamazaki액 1S에는 Ca가 최적 수준이상을 나타내었으나 과잉수준에는 미치지 못하였고 Mg는 모든 배양액 처리구에서 최적 수준 이었다.

이처럼 저농도 수준인 SCU 1/2S액에서 엽내 N, P, K함량이 특히 낮게 나타났는데, 이것은 배양액내 이들 이온의 농도가 최적수준보다 낮았기 때문으로 보인다.

이상의 결과에서 잎상추 수경재배에 적합한 배양액으로 새롭게 조성된 SCU액은 근권내 EC, pH 및 무기성분 농도의 변화가 적었으며 생육도 높은 것으로 나타나 SCU배양액은 국내의 상추 수경재배에 적합한 배양액이라는 것을 알 수 있었다.

2) 식물공장용 반결구 상추 배양액 개발

우리 나라에서는 아직 수요가 많지 않지만 유럽이나 일본 등지에서는 샐러드용으로 인기가 높고 식물공장과 같은 완전환경제어 온실에서 가장 많이 재배되고 있다. 앞으로 우리 나라에서도 수경재배와 식물공장에 적합한 반결구 상추 전용 배양액의 최적이온조성 및 농도를 구명해야 한다. 따라서 일본 야채시험장 표준액을 세 수준의 농도 (1/2, 1, 2S)로 반결구 상추를 재배하면서 양수분 흡수 특성과 흡수율을 조사하였다 (Table 3-8).

Table 3-8. Calculated n/w^z value of butterhead lettuce(cv. omega) based on the Yamazaki's formula.

Nutrient conc.	Items measured	Water (ℓ)	Items measured	PO ₄ -P	K	Ca me · L ⁻¹	Mg
1/2 S	a ^y	15.0	y ^x	1.41	3.64	3.73	2.03
	w	4.59	y ₁	1.52	2.37	4.05	1.95
	a / w	3.27	n / w	1.16	6.52	3.00	2.21
1 S ^w	a	15.0	y	2.65	7.89	7.51	4.04
	w	7.04	y ₁	5.67	6.72	9.38	4.61
	a / w	2.13	n / w	-5.02	10.86	2.76	2.59
2 S	a	15.0	y	5.69	15.76	15.46	8.17
	w	7.19	y ₁	9.10	15.46	18.88	10.03
	a / w	2.09	n / w	-3.45	16.56	6.29	3.19

^zn/w : The formula devised by Yamasaki to determine the amount of macronutrients

and water uptake at regular intervals during water culture

$$\text{if } y > y_1, n/w = \frac{a}{w} (y - y_1) + y_1 ; y < y_1, n/w = y_1 - \frac{a}{w} (y_1 - y)$$

^ya : Initial volume of culture solution in each tray (ℓ).

^xy : The initial concentration of macronutrients in culture solution (me · L⁻¹).

^wS : The nutrient solution of Horticultural Experiment Station in Japan.

w : The amount of water absorbed by plants (ℓ).

y₁ : The final concentration of macronutrients in culture solution (me · L⁻¹).

배양액 농도별 반결구 생육은 엽수, 엽장, 엽폭에서 통계적 유의차는 없었으나 생체중은 1/2S에서 다소 높았으며, 건물중은 고농도에서 높았다 (표 8).

그러나 배양액 개발 기간동안 배양액내 pH와 EC는 다소 안정적이었고 전반적으로 가장 생육이 좋은 1/2S의 양수분흡수율 (n/w)를 기준으로 하여 새로운 배양액을 조성하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

Table 3-9. Effect of the nutrient solution strength on the growth of butterhead lettuce growth at 10 days after transplanting.

Nutrient strength ^z	Tipburn (%)	No. of leaves (each)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
					Shoot	Root	Shoot	Root
1/2S	0	23.6	18.74	16.8 ab ^y	101.14 ab	11.38	3.64 b	0.366
1S	0	22.1	18.66	17.60 a	94.13 a	9.56	4.26 ab	0.376
2S	9.1	25.4	20.18	15.40 b	85.52 b	11.22	4.60 a	0.404

^z: The nutrient solution of Horticultural Experiment Station in Japan.

^y: Means separation within columns by duncan's multiple range test at 5% level.

엽채류의 상품성에 큰 영향을 미치는 잎끝마름증 (tipburn)은 잎상추보다 전반적으로 적게 나타났으며 단지 2S에서 9.1%로 나타났다 (Table 3-9).

이상의 결과로 새롭게 조성한 반결구 상추 배양액의 이온조성은 NO₃-N 9.8, NH₄-N 1.0, PO₄-P 2.0, K 6.5, Ca 3.0, Mg 2.0, SO₄-S 2.0 me·L⁻¹ 로 하였다.

-개발 배양액의 적합성 검증

반결구 상추 배양액으로 개발된 서울시립대 반결구 상추 배양액 (SCU)의 적합성을 검증하기 위하여 식물체 분석자료를 기준으로한 배양액(PL), Yamazaki액 및 PTG액을 사용하여 비교하였다 (Table 3-2).

각 배양액의 농도는 SCU액을 1/2, 1, 2S로 하였고 PL액, Yamazaki액 및 PTG액은 1S하여 실험하였다. 유럽에서 만든 반결구 상추배양액(PTG)의 1S농도가 높으므로 새로 조성한 배양액의 농도를 잎상추와 달리 2S까지 높게 조성하여 사용하였다.

재배기간 동안의 근권내 EC와 pH변화는 Fig(3-3, 3-4)과 같다. pH를 보면 전체적으로 생육초기에 pH가 하강하였고 처리 7일째부터 pH가 높아지는 경향을 보였다. 그 원인은 초기에 NH₄⁺를 비롯한 양이온의 흡수가 왕성하였기 때문에 양이온을 흡수하게 되면 양이온 흡수에 상대되는 이온인 H⁺이온을 방출하기때문에 pH가 낮아졌고 반면에 NH₄⁺ 이온의 흡수가 다 이루어진 이후에는 NO₃⁻ 이온을 중심으로 음이온을 흡수하게 되면서 배양액내로 OH⁻와 HCO₃⁻ 이온을 방출하게 되어

pH가 높아진 결과로 보인 것이다.

생육 7일 이후에는 pH가 안정된 것을 볼 수 있는데 이것은 음이온과 양이온의 흡수가 균형있게 흡수되어진다는 것을 의미한다. EC를 보면 전 재배기간 동안 안정적이며 배양액 조성 자체가 높았던 화란 온실 작은 연구소 배양액 (PTG)와 SCU 2S에서 EC가 3.0 mS/cm수준을 나타냈다(Fig 3-3, 3-4). 각 배양액의 이온 조성을 보면 양이온과 음이온의 비율이 모든 배양액에서 거의 균형을 이루고 있는것을 볼 수 있다.

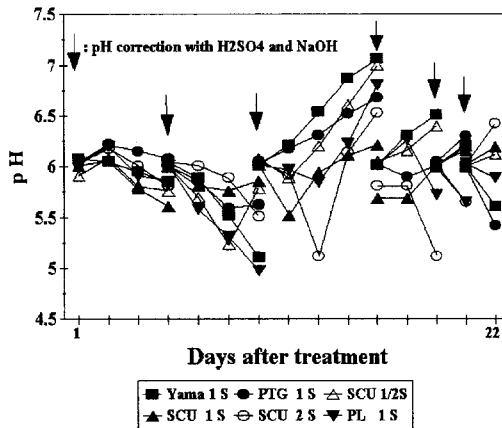


Fig 3-3. Changes of pH in root zone based on the different nutrient solutions for butter head lettuce.

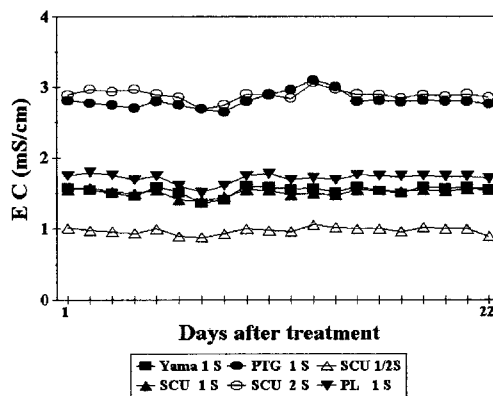


Fig 3-4. Changes of EC in root zone based on the different nutrient solutions for butterhead lettuce.

Economakis(1991)는 상추 NFT재배에서 지상부 생체중이 전기전도도간의 유의성이 없었다고 하였는데 본 연구에서도 배양액간과의 큰 유의차는 없었다. 그러나 농도가 낮은 1/2배액(0.9 mS/cm)에서는 생육이 전반적으로 다른 처리에 비해 낮았다. 이것은 반결구 상추에 적합한 배양액농도는 2.0~2.5 mS/cm이므로 일반 잎상추에 비해 높아 배양액의 농도가 낮은 처리구에서 결구상추의 생육이 잎상추에 비해 낮게 나타났다. 또한 tipburn 발생율에 있어서 Benoit(1992)가 K/Ca비율을 전체 재배시기에 걸쳐 2.3이었을 때 tipburn현상은 나타나지 않았고 전체 재배시기에 걸쳐 적용된 K/Ca의 비율(4.4 mmol K, 4mmol Ca)이 1.1이었을 때 tipburn현상이 일어난다고 하였다. 그러나 재배 초기 생체중과 K/Ca의 비율을 1.1로 하고 생육후기에 2.3비율로 하였을 때 tipburn이 문제되지 않았다고 하였다.

SCU배양액에서는 K/Ca율이 2.2비율이었을 때 tipburn은 거의 나타나지 않아 Benoit(1992)와 유사한 결과를 얻었다.

각 처리별로 반결구 상추의 무기성분 함량을 분석하여 서울 시립대학교 영양진단 기준에 따라 엽내 적정 무기성분 함량을 비교하였다 (표 10).

각 배양액종류와 농도에서 엽내 N, Mg, Ca함량은 적정수준이었으며 PTG액 1S에서 Ca함량이 다소 높았지만 과잉수준은 아니었다.

대체적으로 엽내 무기성분함량이 낮았던 것은 실험기간이 겨울철(1997년 1월부터 2월까지)이어서 일반 상추재배보다 낮았기 때문이라고 생각되어진다. 山崎(1984)는 양분흡수율 (n/w)에 의해 조성한 배양액의 경우 일반적으로 같은 종류의 작물을 가을, 겨울에 재배할 때는 봄, 여름에 재배하는 것보다 1.4~1.6배로 하는 것이 광에 의한 수분흡수율로 인한 이온의 흡수가 균형을 이룬다고 하였고 작물마다 배양액조성은 생육단계에 따라 변하지 않지만 농도는 생육단계에 따라 다소 변화시켜 주는 것이 적합하다고 하였다.

본 실험은 배양액 개발과 개발 배양액의 적합성 평가실험으로 나누어 실시하였는데 개발 실험은 여름에 적합성 실험은 겨울에 행하였기 때문에 적합성 실험시 다소 높은 농도에서 높은 생육과 무기양분 흡수가 이루어졌다고 본다.

배양액종류와 농도별 반결구 상추의 생육(Table 3-11)은 전체적으로 SCU액 (1, 2S)에서 높게 나타났고 배양액 농도가 비슷했던 SCU액 2S와 PTG액 1S의 생육

을 보면 PTG액에서 낮은 생육량을 보였다.

Table 3-10. Effect of the nutrient solutions on the growth of butterhead lettuce at 22 days after treatment.

Nutrient solution ^z	Nutrient conc.	No. of leaves (each)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
					Shoot	Root	Shoot	Root
SCU	1/2S	32.3 b ^y	13.0 b	11.8 c	81.6 b	19.8	4.52	0.98
	1S	40.0 ab	17.2 a	15.4 ab	167.2 a	20.6	5.99	0.77
	2S	41.0 a	18.3 a	16.1 ab	159.5 a	21.6	6.21	0.89
PL	1S	39.0 ab	17.2 a	16.9 a	162.5 a	19.7	7.04	0.90
Yamazaki	1S	40.0 ab	16.8 a	15.2 ab	156.0 a	21.3	6.29	0.65
PTG	1S	36.3 ab	17.0 a	14.0 bc	136.9 a	20.4	5.53	0.77

^zSee the table 3-1.

^yMeans separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

Table 3-11. Nutrient contents of butterhead lettuce grown under different nutrient solutions and nutrient.

Nutrient solution ^z	Nutrient conc	Nutrient content (%)				
		N	P	K	Ca	Mg
SCU	1/2S	4.11	0.49	1.30	1.01	0.36
	1S	5.02	0.66	3.51	1.02	0.39
	2S	5.24	0.81	2.87	1.21	0.37
Yamazaki	1S	4.98	0.64	2.14	1.32	0.29
PTG	1S	5.38	0.71	3.27	2.01	0.81

^zSee the table 3-1.

PTG 1S와 SCU 2S액은 서로 비슷한 농도인데도 생육면에서 차이가 나타난 원인은 우리나라 환경조건에 맞게 개발되었기 때문이라고 생각된다. 또한 농도가 가장 낮았던 SCU액 1/2S에서 낮은 생육결과를 보였는데 이것은 반결구 상추가 잎상추보다는 높은 배양액농도를 요구한다는 것을 보여 주고 있다.

이상으로 반결구 상추재배시 우리 나라 환경조건에 적합한 순환식 배양액을 조성하여 개발 배양액의 적합성 판정 실험에서도 재배기간동안 근권 내 EC와 pH의 변화가 안정적이었으며 엽내 무기성분 또한 영양진단 기준의 적정수준에 있었으며 생육 면에서도 우수하였다.

그러므로 SCU배양액은 국내에서 반결구 상추 수경재배에 적합한 배양액이라는 것을 알 수 있었다.

3) 식물공장용 엔다이브 배양액 개발

배양액 농도별 엔다이브 생육량은 농도에 대한 최대엽장, 지상부와 지하부 생체중 및 건물중간에 유의차는 없었지만, 1배액에서 잎의 분화가 빨랐다(Table 3-12). 그리고 전반적으로 1배액에서 엽수, 지상부 생체중 및 건물중이 높게 나타났다.

Table 3-12. Effect of the ionic strength in endive growth at 10 days after treatment.

Ionic strength ^z	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g · plant ⁻¹)		Dry weight (g · plant ⁻¹)	
				Shoot	Root	Shoot	Root
1/2 S	39.2 b ^y	20.9 a	7.1 a	88.6 a	19.8 a	4.71 a	1.08 a
S	45.8 a	20.8 a	7.4 a	96.4 a	20.1 a	5.16 a	1.07 a
3/2 S	44.6 a	18.9 b	7.0 a	83.1 a	17.9 a	4.95 a	0.98 a

^zThe nutrient solution of Horticultural Experiment Station in Japan.

^yMeans separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

작물 재배기간 동안 배양액내 pH와 EC의 경시적 변화를 살펴보면, 1/2배액과 1배액의 pH가 실험실시 4일 동안 계속해서 하강하여 실험실시 4일째에 수산화나트륨으로 보정하여 주었다. 그리고 EC변화는 세처리 모두 변화가 적었으나 3/2배액에서 후기에 높아지는 경향을 나타냈다(Fig.3-5).

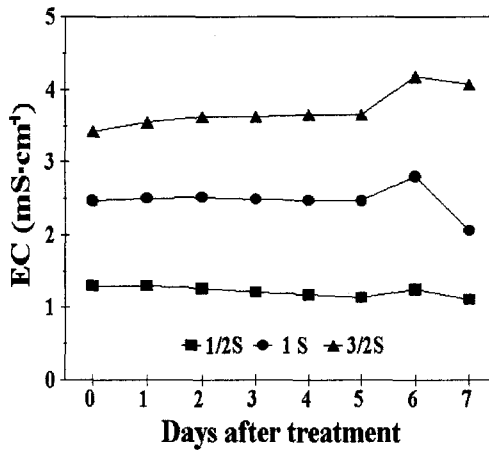
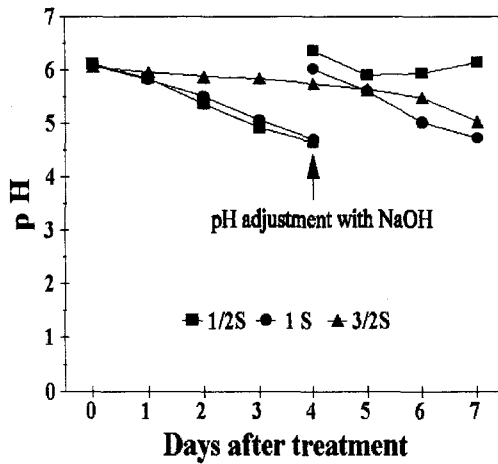


Fig. 3-5. Changes of pH and EC in the nutrient solutions during one week after treatment.

日本野試液 배양액 농도별 엔디브의 양수분 흡수율을 보면, 수분흡수량은 농도가 낮은 1/2배액, 1배액과 3/2배액 순으로 많았으며, 배양액내 무기성분 변화는 세 처리 모두 배양액내 칼륨의 함량이 처음 공급된 양보다 감소한 반면에 Ca과 Mg의 함량은 증가하였다. 인(P)도 1/2배액을 제외하고는 모두 증가하는 경향을 보였다(Table3-13).

Table 3-13. Calculated n/w^z value of endive based on the Yamasaki's formula.

Ionic Strength	Measured items	Water uptake (ℓ)	Measured items	Mineral concentration (me · ℓ ⁻¹)			
				PO ₄ -P	K	Ca	Mg
1/2 S	a ^x	15.0	y ^w	1.96	3.55	3.76	2.31
	w	7.18	y ₁	1.80	1.76	3.80	2.53
	a / w	2.09	n / w	2.13	5.50	3.72	2.07
S ^y	a	15.0	y	3.87	7.83	7.25	4.77
	w	6.04	y ₁	4.33	5.92	8.64	5.47
	a / w	2.48	n / w	3.19	10.66	5.19	3.73
3/2 S	a	15.0	y	5.74	10.65	10.51	6.85
	w	5.16	y ₁	7.29	9.69	13.47	7.97
	a / w	2.91	n / w	2.78	12.48	4.86	4.71

^zn/w : The formula devised by Yamasaki to determine the amount of macronutrients and water uptake at regular intervals during water culture

$$\text{if } y > y_1, n/w = \frac{a}{w} (y - y_1) + y_1 ; y < y_1, n/w = y_1 - \frac{a}{w} (y_1 - y)$$

^yS : The nutrient solution of Horticultural Experiment Station in Japan

^xa : Initial volume of culture solution in each tray (liter)

w : The amount of water absorbed by plants (liter)

^wy : The initial concentration of macronutrients in culture solution (me · ℓ⁻¹)

y₁ : The final concentration of macronutrients in culture solution (me · ℓ⁻¹)

이상의 결과에서 엔디브 재배용 배양액의 조성 실험은 日本野試液 배양액 1배액의 양수분 흡수율을 기준으로 하여 조성할 수 있었다. 즉, 엔디브의 이온조성은 N 16.0, P 3.0, K 10.0, Ca 5.0 및 Mg 3.5 me · ℓ⁻¹로 조성할 수 있었다.

새롭게 조성한 배양액과 기존 배양액간의 생육 및 수량을 검정하기 위한 실험을 수행하였는데, 배양액의 pH는 저농도인 SCUE 1/2배액에서 가장 심했으며, EC 변화는 모든 배양액에서 감소하는 경향을 보였다. SCUE와 PTG 1배액의 pH와 EC 변화는 비교적 안정된 경향이였다. 그러나 SCUE 1배액은 PTG액보다 pH 상승폭이 약간 컸다. 이것은 SCUE 1배액이 PTG액보다 농도가 낮아 이온의 흡수에 따라 빠른 속도로 pH 변화가 유도된 데 기인한 것으로 보인다.

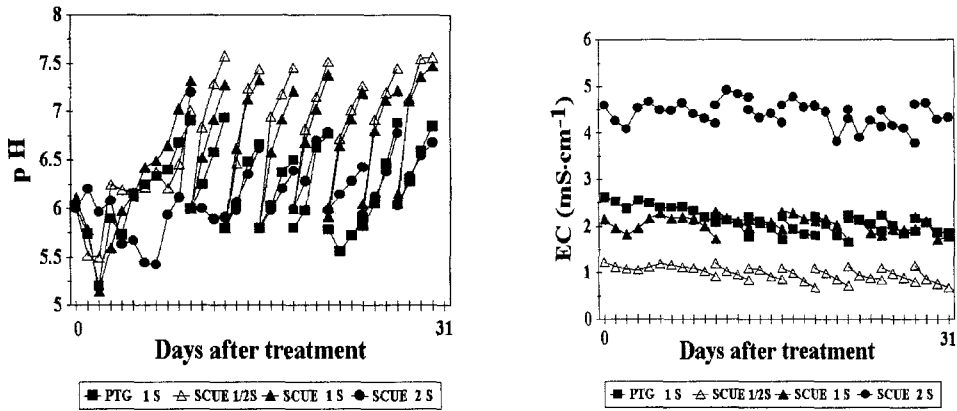


Fig. 3-6. Changes of pH and EC in the nutrient solutions during 31 days after treatment.

Table 3-14. Effect of nutrient solutions on the growth of endives^z at 42 days after treatment.

Nutrient solution	No. of leaves (A)	Leaf Length (cm)	Leaf Width (cm)	Shoot	Leaf
				fresh weight (g · plant ⁻¹) (B)	weight B/A (g · leaf ⁻¹)
PTG	54.5 a ^y	25.8 a	9.0 a	129 a	2.53 a
SCUE	1/2 S	53.1 a	25.5 a	129 a	2.54 a
	1 S	52.1 a	24.9 a	129 a	2.60 a
	2 S	48.9 b	25.3 a	8.1 b	106 b

^zMean of sixteen endive cultivars.

^yMeans separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

정식후 42일째의 생육은 고농도인 SCUE 2배액에서 낮게 나타났으나 SCUE 1/2 배액, SCUE 1배액 및 PTG 1배액간에는 차이가 없었다. 각 배양액 종류간 엽의 분화는 PTG액, SCUE액 순으로 빨랐으며, 지상부 생육량에 대해서 SCUE와 PTG 1배액이 가장 높았던 반면, SCUE 2배액은 가장 낮게 나타났다. 1엽중은 SCUE 1 배액, SCUE 1/2배액, PTG액 순으로 무겁게 나타났다(Table 3-14).

엽내 다량원소와 미량원소의 흡수는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 그러나 배양액내 P, K와 같은 다량원소의 함량은 농도가 높은 배양액에서 식물체내로 많이 흡수되는 경향이였다. 또한 인과 칼슘 함량은 SCUE액보다 PTG액에서 많이 흡수되었으며, 칼륨과 마그네슘 함량이 PTG액보다 SCUE액에서 많이 흡수되었다. 그러나 엽내 함량이 적거나 많다고 하여 결핍이나 과잉증상을 나타낼 수 있는 수준은 아니었다. SCUE액의 농도별 엽내 무기성분 함량은 배양액 농도가 높아질수록 인, 칼륨, 철 및 망간 함량이 증가되었다. 반면에 엽내 칼슘과 마그네슘 함량은 SCUE 1배액에서 높게 나타났다. 미량원소는 철과 망간 흡수에 있어서 SCUE액이 PTG액보다 많이 흡수된 것으로 나타났다(Table 3-15). 이것은 배양액내 철과 망간의 함량 변화로 예측할 수 있었다.

Table 3-15. Effect of nutrient solutions on mineral contents of endives leaves^z at 42 days after treatment.

Nutrient solution	Macroelement content (%/D.W.)				Microelement content (ppm/D.W.)			
	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
PTG	0.71 a ^y	7.58 c	1.42 a	0.35 ab	190 b	25.3 b	23.9 c	74.7 a
SCUE 1/2S	0.56 c	7.66 c	1.17 ab	0.38 a	172 b	32.0 a	33.0 c	83.7 a
1 S	0.65 b	8.49 b	1.26 ab	0.40 a	218 a	24.8 b	67.8 b	80.9 a
2 S	0.72 a	9.36 a	1.02 b	0.33 b	233 a	27.1 b	78.8 a	80.2 a

^zMean of sixteen endive cultivars.

^yMeans separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

여름철 재배로 인해 근권온도가 24~28℃로 높았음에도 불구하고 뿌리 피해는 전혀 없었으며, 지상부 생육 또한 근권온도의 상승으로 인하여 억제되지도 않았다. 다만 높은 광도와 배양액 온도 상승으로 인해 배양액내 인과 칼륨의 흡수가 급속히 진행되었으며, 칼슘과 마그네슘 흡수도 두 배양액에서 모두 증가된 것으로 나타났다. Adams와 Smith, Adams와 Leoni은 토마토 양액재배에서 수분, 질소 및 칼륨의 흡수는 광도와 밀접한 관련이 있으며, 인 흡수는 배양액 온도와 밀접한 관련이 있다고 하였다. 그리고 안과李大도 광이 강한 봄, 여름 재배시에는 칼륨의 흡

수가 증대된다고 하였다. 그리고 근권온도가 상승함에 따라 칼륨의 흡수는 증가하지만, 2가의 양이온인 칼슘과 마그네슘은 흡수가 저하되는 경향이 있다고 하여본 실험과 비슷한 결과를 나타내었다.

Table 3-16. Mineral concentration in the nutrient solution during 32 days after treatment.

Nutrient solution	Macroelement concentration (me · ℓ ⁻¹)						Microelement concentration (mg · ℓ ⁻¹)			
	NO ₃ -N	P	SO ₄ -S	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
PTG	8.79	2.85	1.60	1.20	11.5	3.47	0.92	1.39	0.02	1.00
SCUE 1/2S	4.64	0.13	1.85	0.31	4.45	2.92	1.21	1.06	<0.01	0.86
1 S	8.49	0.56	2.51	3.95	7.13	4.63	0.79	1.18	<0.01	1.33
2 S	12.2	3.70	3.17	13.7	11.0	8.60	1.24	1.47	0.06	1.64

실험에 사용된 배양액 모두 다량원소중 질산태질소, 인 및 칼륨의 흡수가 상대적으로 높은데 비하여 칼슘, 마그네슘과 황이 배양액에 계속 축적되었으며, 미량원소중 아연, 구리 및 철 또한 축적되는 경향을 보여, 이 시기(정식후 30일 정도)에 배양액을 완전히 교체해 주는 것이 좋을 것으로 생각된다. 宇田(1992)도 공급되는 원소와 축적된 원소간의 상호작용으로 인해 배양액 조성의 불균형이 초래되어 생육에 영향을 끼칠 수 있으므로 배양액을 완전히 교체해 주는 것이 좋다고 하였으며,朴과 金도 각 이온이나 전체 이온의 적정 농도는 식물의 종류, 생육단계, 온도, 습도와 재배 방식 등에 의해 변하는데, 배양액 조성이 적절하지 못하면 배양액 관리가 어렵고 품질도 나빠지므로, 보통 배양액을 2~3주 간격으로 교체해야 한다고 하여 근권내 일부 이온의 집적이 문제시 됨을 밝히고 있다.

이상의 결과로 미루어 보면, 엔디브 양액재배를 위해 새로 조성한 배양액은 기존의 유럽 배양액과 비교하여 별다른 차이는 없는 것으로 판단된다. 다만, 앞으로 지속적인 배양액 사용과 환경문제를 고려할 때, 이온센서를 이용한 부족한 이온과 과잉의 이온공급을 자동으로 조절할 수 있는 체계의 도입이 반드시 필요하리라

생각된다.

4) 식물공장용 치커리 배양액 개발

배양액 개발실험을 한 결과, 치커리는 일본원시액 1S농도에서 엽수, 지상부 생체중 및 건물중이 다른 처리보다 높아, 일본원시액 1S농도에서 나온 n/w수치를 기준으로 하여 조성한 배양액은 N 13.0, P 3.0, K 7.2, Ca 4.0, 및 Mg 3.0 me/ℓ 으로 조성하였다.

Table 3-17. Calculated n/w value of chicory based on Yamasaki's formula.

Nutrient conc.	Items measured	Water (ℓ)	Items measured	PO ₄ -P (me/ℓ)	K (me/ℓ)	Ca (me/ℓ)	Mg (me/ℓ)
1/2 S	a	15.0	y	1.96	3.55	3.76	2.31
	w	4.28	y ₁	1.63	2.80	4.20	2.56
	a / w	3.51	n / w	2.79	5.43	2.66	1.68
S	a	15.0	y	3.87	7.83	7.25	4.77
	w	5.36	y ₁	3.88	7.22	8.68	5.37
	a / w	2.80	n / w	3.85	8.93	4.68	3.69
3/2 S	a	15.0	y	5.74	10.65	10.51	6.85
	w	4.74	y ₁	7.01	11.03	13.86	7.80
	a / w	3.17	n / w	2.98	9.83	3.24	4.79

n/w : the formula devised by Yamasaki to determine the amount of macronutrients and water uptake at regular intervals during water culture

$$\text{if } y > y_1, n/w = \frac{a}{w} (y - y_1) + y_1 : y < y_1, n/w = y_1 - \frac{a}{w} (y_1 - y)$$

S : the nutrient solution of Horticultural Experiment Station in Japan

a : initial volume of culture solution in each tray (liter)

w : the amount of water absorbed by plants (liter)

y : the initial concentration of macronutrients in culture solution (me/ℓ)

y₁ : the final concentration of macronutrients in culture solution (me/ℓ)

기존의 엔디브용 유럽배양액과의 비교실험을 한 결과, 생육조사에서 기존 엔디브액과 새로 조성한 배양액간의 유의차는 없었다. 조성 배양액의 농도에 따른 치커리 생육은 1mS/cm~3mS/cm 범위에서 차이를 나타내지 않았다. 사용한 배양액의 pH와 EC는 비교적 안정된 상태를 유지하였다. 배양액내 다량원소를 분석한 결과, 배양액 모두 마그네슘이 증가하는 경향을 보였고, 인과 칼륨은 감소하는 경향을 보였다. 그리고 칼슘은 유럽배양액에서 많이 함유되어 있었다. 이들 무기이온의 근권내에 적정수준으로 계속 유지될 수 있도록 배양액 조성과 조절에 대한 충분한 연구 검토가 되어야 식물공장체계에서도 활용될 수 있으리라 본다.

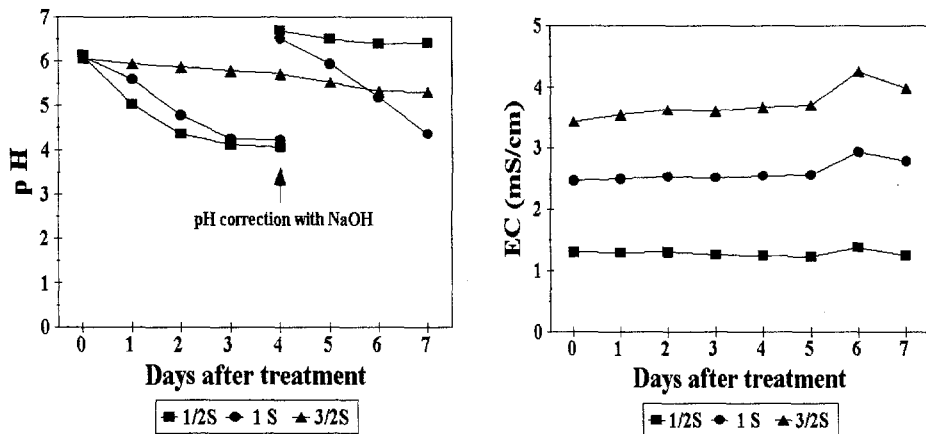


Fig. 3-7. Changes in pH and EC of nutrient solution during 1 week.

Table 3-18. Effect of total nutrient concentration in nutrient solution on the growth of chicory as measured after 10 days of culture(Light intensity is $730 \mu \text{mol/m}^2/\text{s}$ and Leaf temp. is 38°C).

Treatment	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		CO ₂ assimilation rate ($\mu \text{mol/m}^2/\text{s}$)
				Shoot	Root	Shoot	Root	
1/2 S	18.2	19.9	14.0	52.27	14.13	4.35	1.04	7.165b ²⁾
S	20.4	18.2	13.4	56.74	13.73	4.38	0.84	7.886ab
3/2 S	19.0	18.2	15.1	49.61	16.44	4.09	1.08	8.600a

²⁾ Means separation within columns by duncan's multiple range test at 5% level.

Table 3-19. The nutrient solutions of Sonneveld, n/w value and plant analysis. (unit:me/ ℓ)

Nutrient solution ²⁾	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg
Sonneveld	19.0	1.25	6.0	9.0	10.0	3.0
SCU I	11.6	1.4	3.0	7.2	4.0	3.0
SCU II	9.6	1.4	3.6	7.4	2.0	1.0

²⁾ Sonneveld : nutrient solution optimized for endive by Sonneveld(1992).
 SCU I : n/w value of 1 strength concentration from table 1.
 SCU II : nutrient solution based on plant analysis.

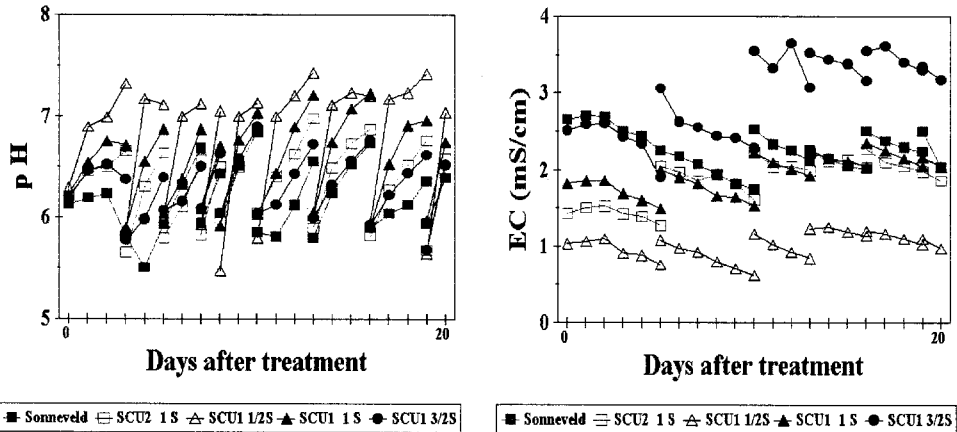


Fig. 3-8. Changes in pH and EC of nutrient solution during culture.

Table 3-20. Effect of nutrient solution on the growth of chicory after 25days of culture

Nutrient solution	No. of leaves	Leaf (cm)		Fresh weight (g/plant)
		Length	Width	
Sonneveld	22.3	19.7	17.9	92.3
SCU II	20.3	18.4	20.9	87.8
SCU I 1/2 S	20.5	17.5	19.5	91.5
1 S	25.0	18.5	18.6	93.9
2 S	22.0	19.5	20.1	98.0

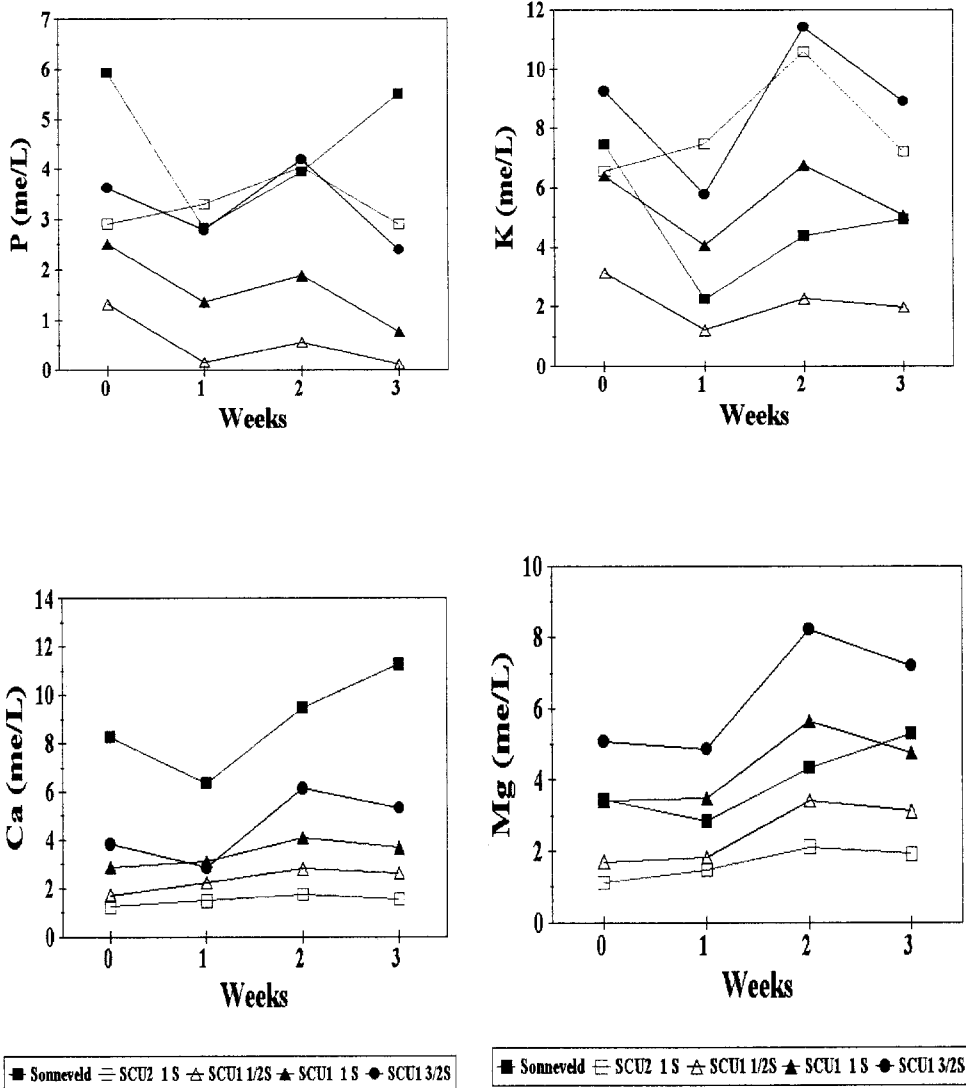


Fig. 3-9. Changes in macronutrient concentration of nutrient solution during culture.

이상의 결과로써, 새로 조성한 배양액이 치커리를 재배하는데 적합한 배양액으로 사용할 수 있다는 결론을 얻었다. 앞으로는 조성된 배양액을 중심으로 품질향상에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 하겠다.

5) 식물공장용 딜 배양액 개발

딜의 수경재배에 적합한 배양액을 조성하기 위하여 일본야채시험장 표준액을 1/4배액(1/4 S), 1/2배액(1/2 S), 1배액(1 S) 으로 3가지 수준의 농도로 조성하여 딜을 재배하면서 양수분 흡수율(n/w)을 조사하였다 (Table 3-21).

Table 3-21. Calculated n/w values of dill (*Anethum graveolence* L.) by Yamasaki's formula in hydroponics.

Nutrient Conc.	Items measured ^y	Water (ℓ)	Items measured	N	P	K	Ca	Mg
				me · L ⁻¹				
1/4 S ^z	a	20.0	y	4.01	0.82	2.84	1.81	0.91
	w	9.41	y ₁	1.56	0.33	0.56	1.57	0.75
	a / w	2.13	n / w ^y	6.76	1.37	5.40	2.07	1.08
1/2 S	a	15.0	y	7.96	1.88	4.85	3.06	1.94
	w	7.04	y ₁	5.46	1.45	2.61	3.49	2.39
	a / w	2.13	n / w	9.41	2.12	6.16	2.81	1.67
1 S	a	15.0	y	14.64	3.85	10.05	5.18	3.67
	w	7.19	y ₁	17.83	4.11	9.94	7.01	4.88
	a / w	2.09	n / w	23.78	4.60	10.15	10.41	2.63

^z Strength of nutrient solution.

^y The formula devised by Yamasaki to determine the amount of macronutrients and water uptake at regular intervals during water culture.

$$y > y_1, \quad n/w = \frac{a}{w} (y - y_1) + y_1$$

$$y < y_1, \quad n/w = y_1 - \frac{a}{w} (y_1 - y)$$

where,

n = nutrient absorpyion,

a = initial volume of culture solution in each tray (liter),

w = the amount of water absorbed by plants (liter),

y = the initial concentration of macronutrients in culture solution (me · L⁻¹), and

y₁ = the final concentration of macronutrients in culture solution (me · L⁻¹).

영양생장기동안 배양액 농도별 양수분흡수율을 조사한 결과 식물에 의한 수분 흡수량은 농도가 낮은 1/4배액에서 가장 많았으며 배양액 농도가 높아질수록 양수분 흡수율도 높았음을 볼 수 있다. 배양액내 무기성분 변화는 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, K의 함량이 1/4배액과 1/2배액에서 감소되었던 반면 Ca과 Mg은 처음의 공급된 양과 거의 같은 수준으로 유지된 것을 볼 수 있다. Udagawa (1995)는 딸의 NFT재배에서 양분흡수율을 조사하였을 때 N:P:K:Ca:Mg의 비율이 15:2:10:3:2였다고 하여 본 실험에서와 유사한 결과를 나타내었다.

배양액 개발기간의 근권내 pH와 EC의 변화를 보면, 저농도인 1/4배액에서 pH의 변화폭이 가장 크게 나타난 반면 1배액에서는 비교적 안정된 경향을 나타내었다(Fig.3-10). 이러한 근권의 pH는 양분의 유효도와 흡수에 있어서 가장 중요한 요소로서(Adams 등, 1979; Peterson, 1980; Adams, 1986), 근권내 pH의 변화는 음이온과 양이온의 불균형적인 흡수로 인해서 일어난다(Riley와 Barber, 1971). 저농도인 1/4배액에서 pH의 변화가 크게 나타난 것은 작물에 의한 물의 흡수보다 양분의 흡수가 더 왕성해지면서 일본 야채시험장 표준액의 P 급원으로서 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 이 사용되었기 때문으로 보인다. 즉 작물이 NH_4^+ 이온을 우선적으로 흡수하면서 일시적으로 pH가 낮아지지만 NH_4^+ 의 흡수가 이루어지고 나면 NO_3^- 를 급속히 흡수하면서 pH가 다시 상승하기 때문이다(池田, 1983; 岩田, 1985). 山崎(1984)도 같은 결과를 발표했는데, 일본 야채 시험장 표준액을 1/2배액, 1배액 및 3/2배액으로 조제하여 실험했을 때 배양액의 농도가 낮을수록 pH의 변화가 컸다고 하였다.

근권내 EC는 세 가지 수준의 농도처리 모두 재배기간동안 안정된 경향을 보였지만 저농도인 1/4배액에서 재배 후기에 낮아지는 경향을 보였다. 이것은 생육이 진전되면서 딸의 양수분흡수 특성상 공급되는 양분의 양보다 작물에 의한 양분의 흡수가 더 왕성하였기 때문인 것으로 보인다(Fig.3-10).

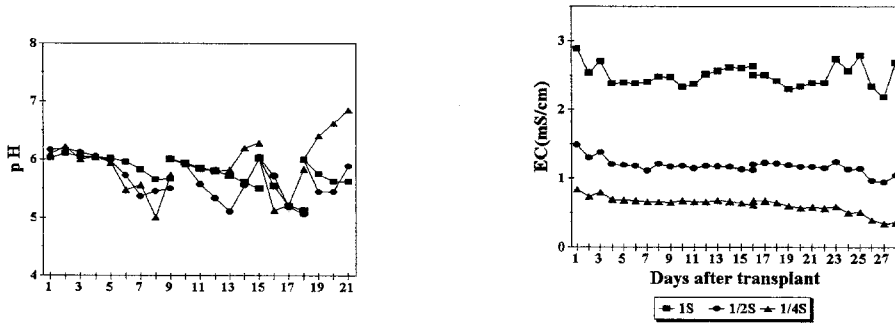


Fig. 3-10. Changes of root zone pH and EC over time.

일본 야채시험장 배양액 농도가 딜의 생육 및 수량에 미치는 영향을 보면 표 3와 같다. 전반적으로 1/4배액에서 가장 낮은 생육을 보인 반면 1/2배액에서 초장, 경경 및 생체중이 높게 나타났다. 이것은 근권내 pH와 EC의 변화폭이 비교적 작았기 때문에 작물의 양수분 흡수패턴과 거의 유사하게 유지된 것으로 볼수 있다. 池田(1986)는 작물별 양수분특성에 알맞은 배양액을 공급하면 근권내 EC, pH 및 무기양분 조성이 쉽게 변하지 않았다고 하여 이를 반증하여 주고 있다.

Table 3-22. Effects of different nutrient concentration on the growth of dill (*Anethum graveolence* L.) using the nutrient solution of National Horticultural Research Station in Japan

Nutrient Conc. ^z	Plant height (cm)	No. of branches	Shoot width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		Percentage of dry matter (B/A)(%)
				Shoot(A)	Root	Shoot(B)	Root	
1/4 S	46.1 b ^y	16.4	0.66 b	103.3 b	24.8	7.59 b	1.26	7.34
1/2 S	57.9 a	17.6	0.80 a	144.0 a	22.6	10.36 a	1.28	7.19
1 S	52.5 ab	16.2	0.74 a	118.4 b	24.4	8.51 ab	1.26	7.19

^z Concentration of nutrient solution.

^y The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test at 5% level.

일본 야채 시험장 표준액을 1/4배액, 1/2배액 및 1배액의 세가지 농도로 조성하여 재배한 후 정식 28일 후의 식물체내 무기성분 함량을 측정하였다. 엽내 무기성분을 분석한 결과, 전반적으로 배양액 농도가 높아질수록 엽내 무기성분 함량도 높아지는 경향을 보였다(Table 3-23).

Udagawa(1995)는 배양액 농도가 딜과 thyme(백리향)의 생육에 미치는 영향을 조사한 결과 배양액 농도가 높을수록 딜의 잎과 뿌리내의 N, P, K 등의 다량원소의 함량과 정유의 생산량이 높았다고 하여 본 실험과 유사한 결과를 보여주었다.

Table 3-23. Mineral contents in shoot and root of dill grown under different nutrient concentrations at 28 days after transplant.

Nutrient conc. ^z	T-N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
	(%)					(mg·kg ⁻¹)			
- Leaf -									
1/4 S	4.94	0.63	7.28	1.43	0.39	186.4	20.4	79.6	113.8
1/2 S	5.06	0.73	8.41	1.60	0.45	235.4	23.6	100.0	107.4
1 S	5.04	0.75	7.82	1.42	0.41	445.2	65.6	129.0	109.0
- Root -									
1/4 S	3.83	0.84	6.88	0.63	0.68	1141	26.2	263.2	214.2
1/2 S	4.28	0.80	7.19	0.76	0.58	1779	47.0	606.0	113.4
1 S	4.35	0.89	7.92	0.88	0.45	1663	64.4	206.0	97.4

^z Concentration of nutrient solution

개화기 직전 엽내 무기성분을 조사한 결과 생육과 수량이 높게 나타났던 1/2배액에서의 엽내 Ca, Mg, Fe 및 Cu의 함량이 다른 농도에서 보다 높았음을 볼 수 있었다(Table 3-24). 본 실험에서의 식물체 분석치는 상추, 엔디브 등의 엽채류의 식물체내 영양진단기준(中村 등, 1989; Jones와 Wolf, 1991)보다 P, Ca, K 등의 다량원소의 함량이 높았을 뿐만 아니라 Fe, Cu의 함량은 5~8배 이상 높게 나타났다.

Table 3-24. Mineral contents in the leaves of dill grown under different nutrient concentrations at 45 days after transplant.

Nutrient conc. ^z	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
	(%)					(mg·kg ⁻¹)			
1/4 S	2.62	0.40	4.35	1.53	0.33	184.6	20.4	43.4	83.4
1/2 S	4.07	0.68	5.75	1.84	0.46	216.6	22.4	70.6	64.2
1 S	4.52	0.88	7.96	1.51	0.35	193.4	21.8	113.2	66.0

^z Concentration of nutrient solution

이상의 결과, 일본 야채 시험장 1/2배액에서 생육과 수량이 가장 높았으며 근권내 pH와 EC의 변화도 안정되었으므로 딜의 양분흡수특성에 적합할 것으로 판단되었다. 池田(1986)는 작물의 양수분 흡수특성에 적합한 배양액이 공급되면 양이온과 음이온의 흡수가 균형을 이루게 되어 pH와 EC의 변화가 안정될 뿐만 아니라 배양액내 무기성분의 변화가 적어 작물의 생육이 조장되어 생산성과 고품질을 기대할 수 있다고 하였다.

따라서, 1/2배액의 양수분 흡수율(n/w)을 기준으로 조성한 딜의 최적 이온조성은 NO₃-N 8.85, NH₄-N 0.55, P 2.1, K 6.2, Ca 2.8, Mg 1.7me·L⁻¹이 적합할 것으로 나타났으며 이 표준액(1배액)을 서울시립대 딜 배양액(SCU)으로 하였다.

-개발 배양액의 적합성 검토

딜의 양수분 흡수율에 따라 조성한 배양액에 대한 적합성을 검토하기 위하여 기존 허브배양액 개발에 사용된 일본야채시험장 표준액(HRS)과 비교실험을 수행하였다. 실험에 사용된 배양액의 무기성분 조성은 Table3-25와 같다.

새로 개발된 SCU 배양액과 일본야채시험장 1/2배액을 사용하여 딜을 재배했을 때 처리후 23일 동안의 근권내 pH와 EC의 변화는 그림 2~3과 같다.

근권내 pH는 모든 배양액에서 상승하는 경향을 나타내었는데 저농도인 SCU 1/2 S와 HES 1/2 S에서 pH 상승폭이 크게 나타났다. pH의 상승은 NO₃⁻와 P과

같은 음이온의 흡수가 양이온인 K, Mg, Ca의 흡수보다 더 왕성했기 때문이다(位田, 1982 ; 박과 김, 1991).

Table 3-25. The composition of HRS and SCU nutrient solutions for dill hydroponics.

Nutrient solution ^z	Nutrient solution (me·L ⁻¹)							
	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg	S	A/C ^y
HRS	16.0	1.33	4.0	8.0	8.0	4.0	4.0	1.26
SCU	8.85	0.55	2.1	6.2	2.8	1.7	1.7	1.12

^z SCU; the nutrient solution devised by The University of Seoul.

HRS; the nutrient solution of National Horticultural Research Station in Japan.

^y A : Anions (NO₃-N + PO₄-P + SO₄-S)

C : Cations (NH₄-N + K + Ca + Mg)

또한, 位田(1982)는 몇가지 채소를 Hoagland 1/2배액으로 8일동안 재배하여 경시적인 pH변화와 양분흡수량을 측정하였을때 가지, 토마토는 양액의 pH 상승이 현저했으며 배양액의 농도수준이 낮을수록 그 변화가 컸다고 하였다. 마찬가지로 山崎(1984)는 이러한 pH의 상승이 용수의 pH가 7.3~7.5로 높고 배양액 농도가 낮을수록 그 영향이 컸다고 하였다. 이것은 전기전도도가 낮아 이온의 흡수에 따라 빠른 속도로 pH상승이 유도되었기 때문이라고 하여 본 연구결과를 확인시켜 주었다.

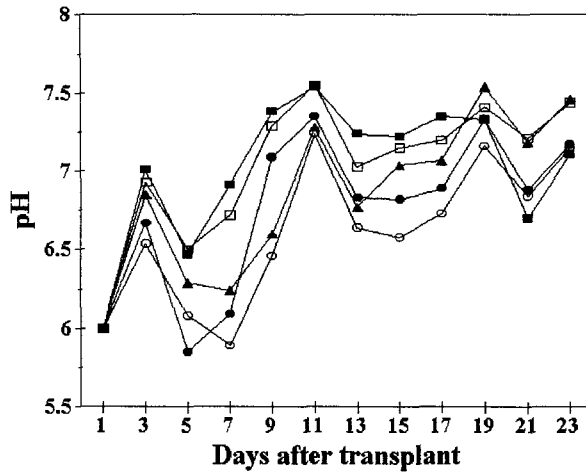


Fig. 3-11. Changes of root zone pH over time. [HRS 1/2 S(▲), SCU 1/2 S(■), SCU 1 S(□), SCU 3/2 S(●), and SCU 2 S(○)]

근권내 EC는 비교적 안정되었으으며 생육이 진행되서 양분 흡수량이 물의 흡수보다 많았기 때문에 모든 처리에서 차츰 낮아지는 경향을 보였다. 양액재배에서 양분 공급을 조절하기 위한 가장 실제적인 방법은 근권에서 EC로 용액의 전체이온 농도를 측정하는 것이다(Anon, 1986).

높은 EC는 엽채류와 과채류의 영양학적 상태와 수확량을 저하시키며 양분의 흡수를 저해시켜 생육이 억제된다(Adams, 1991). 따라서 작물의 양수분흡수율(n/w)을 측정하여 양분조성을 하면 무기성분의 흡수가 균형을 이루어 근권내 EC가 안정되며 양분흡수가 최적화된다.

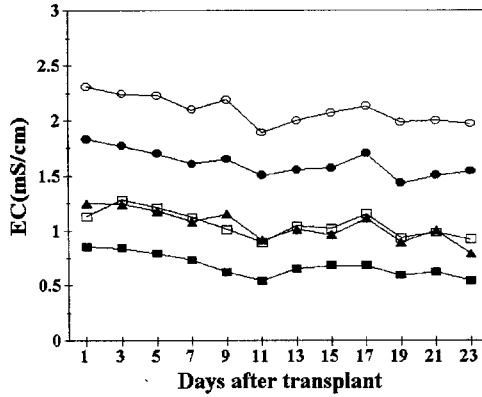


Fig. 3-12. Changes of root zone EC over time. [HRS 1/2 S(▲), SCU 1/2 S(■), SCU 1 S(□), SCU 3/2 S(●), and SCU 2 S(○)]

일본야채 시험장 표준액의 1/2배액과 SCU 배양액의 1/2배액, 1배액, 3/2배액 및 2배액으로 NFT시스템하에서 재배하였을 때 처리후 3주동안의 배양액내 다량원소와 미량원소의 농도를 측정하였다(Fig. 3-13~16).

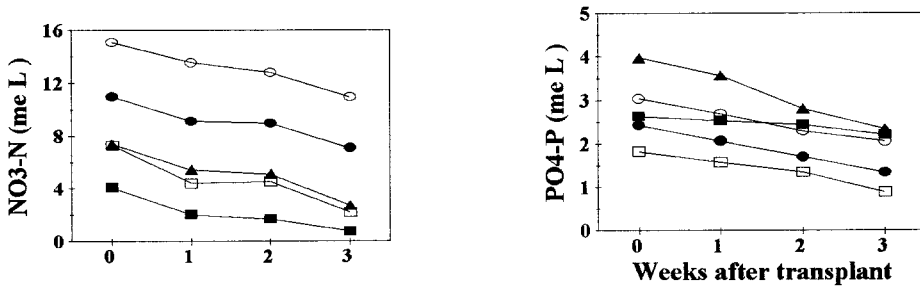


Fig. 3-13. Changes of NO₃-N, PO₄-P concentration in the nutrient solutions during 3 weeks after transplant. [HES 1 S(▲), SCU 1/2 S(■), SCU 1 S(□), SCU 3/2 S(●) and SCU 2 S(○)]

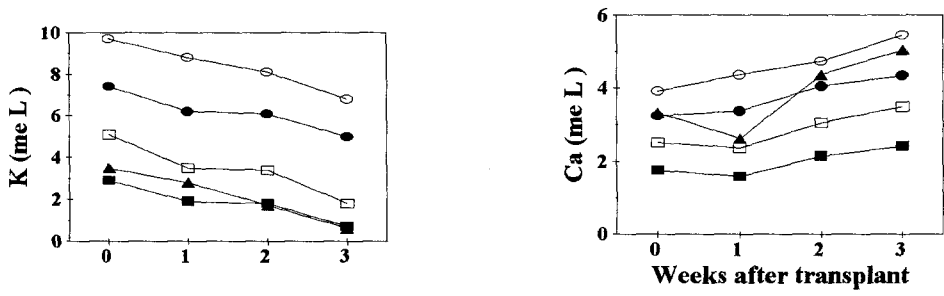


Fig. 3-14. Changes of K and Ca concentration in the nutrient solutions during 3 weeks after transplant.[HES 1 S(▲), SCU 1/2 S(■), SCU 1 S(□), SCU 3/2 S (●) and SCU 2 S(○)]

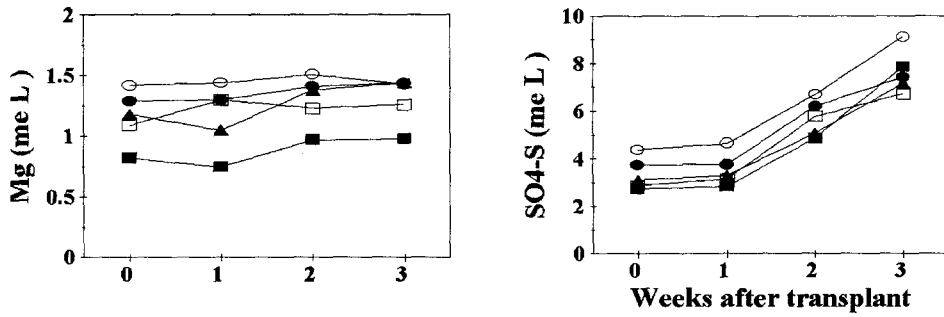


Fig. 3-15. Changes of Mg and SO₄-S concentration in the nutrient solutions during 3 weeks after transplanting.[HES 1 S(▲), SCU 1/2 S(■), SCU 1 S(□), SCU 3/2 S (●), and SCU 2S(○)]

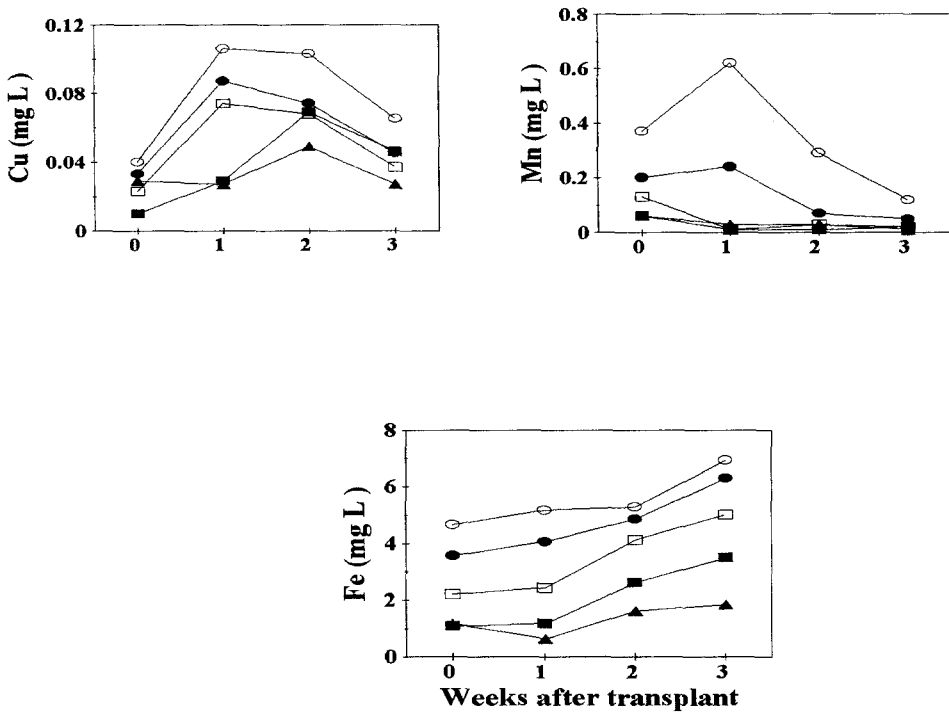


Fig. 3-16. Changes of Cu, Mn and Fe concentration in the nutrient solutions during 3 weeks after transplant.[HES 1 S(▲), SCU 1/2 S(■), SCU 1 S(□), SCU 3/2S(●), and SCU 2 S(○)]

전반적으로 전 생육기간동안 근권내 NO_3^- , P 및 K의 함량은 생육이 진전됨에 따라 감소하는 경향을 보인 반면, Ca 함량은 상승하는 경향을 보여 근권내에서 축적되었음을 볼수 있었다. 또한 배양액내 Mg함량은 초기의 공급액과 거의 비슷한 수준의 적정농도를 유지하였다. 따라서, 음이온중 NO_3^- 와 P을 비롯한 음이온의 흡수가 양이온의 흡수보다 조장되어 모든 처리구에서 근권내 pH가 상승된 것으로 생각된다. 저농도인 SCU 1/2배액에서 NO_3^- 함량은 처리 3주후 10 ppm이하로 떨어져 근권내 충분한 질소공급이 이루어지지 않아 생육이 다른 처리구에 비해 낮은 것으로 보인다(Fig. 3-13).

황산이온(SO_4^{2-})은 근권내에서 계속 축적되는 경향을 보였다. 이것은 1가의 음이

온인 NO_3^- 가 2가의 음이온인 SO_4^{2-} 의 흡수를 저해한 것으로 생각된다(Fig.3-15). 이러한 SO_4^{2-} 의 집적은 작물생육에 영향을 줄수 있다. Cerdra 등(1984)은 NFT 시스템에서 같은 배양액을 장기간 사용할 때 작물생육과 생산량에서 부정적인 영향을 끼칠 수 있으며 이것은 급액내의 황산의 집적에 의한 원인이 크다고 하였다.

과채류의 양액재배에서도 일반적으로 N, P 및 K 함량의 저하와 Ca와 Mg의 상승이 나타난다(嶋田, 1989; 板東, 1991). Zekki 등(1996)은 토마토의 순환식 NFT재배에서 장기간의 양액순환에 의한 SO_4^{2-} 의 집적은 무기성분 농도의 불균형을 초래하였으며 K 등의 무기성분 흡수에 영향을 주어 결과적으로 과실중과 생산량을 감소시켰다고 하였다.

따라서, 본 실험에서 딜의 순환식으로 개발된 추비용 배양액은 N, P, K 함량을 늘려주고 S 함량은 줄여주는 방향으로 연구되어야 한다고 생각된다.

본 실험에서의 P과 K의 감소는 실험 기간의 광도와 근권의 온도와 관계가 있는 것으로 생각된다. 宇田川(1994)는 허브식물의 생육 및 방향성분 함량에 미치는 배양액 온도의 영향에 대한 실험하였는데 배양액온도에 따라 작물의 생육반응이 다르고 무기성분 함유율도 달라지므로 작물마다 배양액온도 및 배양액 조성을 달리 할 필요가 있다고 하였다. 橘(1986)는 딸기 양액재배시 일사량이 적어질수록 K의 흡수가 현저하게 억제된다고 하였는데 K는 광합성 작용, ATP 생성, 효소활성, 기공개폐 등에 깊이 관여하기 때문에 여름철 강광하에서는 겨울철보다 더 많이 흡수된다고 하였다. 이처럼 배양액내 P와 K가 감소되는 결과는 재배환경과도 밀접한 관계가 있다는 것을 보여주었다.

미량원소중 Fe는 배양액 내에 계속해서 축적되었으나 Mn과 Cu는 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 加藤(1996)는 장미양액재배에서 근권온도가 높으면, Mn의 흡수가 촉진되기 때문에 Mn과잉에 의한 철결핍을 일으키기 쉽고, 식물체내 인의 과잉흡수로 Zn, Cu의 결핍증이 유발되기 쉽다고 하였다. 그러나 이 경우는 특별한 경우에 나타나며 본 실험에서 이러한 결과는 나타나지 않았다. 따라서 미량원소의 결핍과 과잉을 막기 위한 딜의 추비용 배양액은 Fe의 함량은 줄이고 생육이 어느 정도 진전된 후 Mn과 Cu의 함량은 높이는 방향으로 고려되어야 할 것으로 나타났다.

식물의 성장과 발달에 적합한 조건을 유지하기 위해서는 적합한 환경조절과 특정 작물 및 품종의 무기물 요구도를 맞추어 준 균형잡힌 배양액의 사용이 필요하다(Zekki, 1996). 배양액의 농도를 재배기간 동안 균일하게 유지시켜도 배양액내 각 이온의 농도가 균등하게 유지되는 것은 아니다. 따라서, 宇田川(1992)은 부족한 원소만을 따로 공급해 주는 것이 좋지만 공급되는 원소와 축적된 원소간의 상호작용으로 인해 식물체내로의 흡수에 영향을 미칠 수 있으므로 배양액을 완전 교체해 주어야 한다고 하였다. 최근의 연구에서는 NFT시스템에서 각각의 작물에 흡수되어 부족한 이온을 공급하여 조절하거나 축적되는 이온의 공급을 줄여 배양액내 모든 이온이 최적조건으로 유지될 수 있는 재배관리 방법이 강구되고 있다.

기존의 일본야채시험장 표준액과 개발된 배양액으로 재배한 딜의 생육조사 결과, 일본야채시험장 1/2 S와 저농도인 SCU 1/2 S에서 생육량이 낮았던 반면 SCU 1 S, 3/2 S 및 2 S 배양액에서의 지상부 생육은 높게 나타났다. 그러나 이들 SCU 배양액간의 통계적인 유의차는 나타나지 않았다. 따라서 딜의 생육에 있어서는 SCU 1배액과 2배액 사이의 농도로 EC수준이 1.2~2.4 mS/cm범위가 가장 적합한 것으로 나타났다(표 7).

Udagawa(1995)도 딜의 NFT재배에서 지상부와 지하부의 생체중이 고농도에서 높게 나타났다고 하였지만 배양액 농도간 큰 유의차는 나타나지 않았다고 하여 이를 입증하여 주고 있다.

Table 3-26. Effects of the nutrient solutions on the growth of dill at 21 days after transplanting.

Nutrient solution ^z	Nutrient conc.	Plant height (cm)	No. of branches	Shoot diameter (cm)	Root length (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
						Shoot	Root	Shoot	Root
HES	1/2 S	72.3 ab ^y	16.5	1.35	56.2 a	105.5 ab	22.3	8.22 ab	1.09
SCU	1/2 S	67.2 b	15.0	1.28	42.5 b	74.9 b	19.2	5.59 b	0.82
	1 S	75.9 ab	17.0	1.39	46.1 b	128.7 a	23.6	9.69 a	1.17
	3/2 S	80.1 a	16.5	1.36	49.4 ab	126.0 a	23.7	9.25 a	1.13
	2 S	69.5 b	15.8	1.44	46.7 b	123.9 a	21.0	9.00 a	1.00

^zSee table 3-25

^yThe Values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test at 5% level.

배양액의 실증실험에서 엽내 무기성분의 흡수상태를 보면 배양액간 엽내 다량 원소와 미량원소의 뚜렷한 차이는 나타나지 않았지만 SCU 1배액에서의 엽내 Ca, Mg 및 Fe 의 함량은 다른 농도에서 보다 높았으며 엽채류의 식물체내 영양진단 기준(Jones와 Wolf, 1991)보다 높게 나타났다(Table 3-27).

본 실험에서 엽내 P와 K함량은 배양액 농도가 높아질수록 증가되는 경향을 나타내었고 N함량은 배양액간 차이가 크게 나타나지 않았다. 미량원소의 경우, Fe을 제외한 Cu, Mn, Zn는 배양액의 농도가 높은 처리구에서 엽내 함량도 증가되었음을 볼 수 있었다.

Table 3-27. Nutrient contents of dill leaves grown in different nutrient solutions and concentration at 21days after transplant.

Nutrient solution ^z	Nutrient conc	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
		(%)				(mg · kg ⁻¹)				
HES	1/2S	4.64	0.65	8.18	1.62	0.43	203.6	27.8	66.8	130.0
SCU	1/2S	4.42	0.55	8.48	1.39	0.35	172.6	24.6	44.0	102.4
	1S	4.54	0.59	7.01	1.48	0.41	210.2	25.0	48.2	121.8
	3/2S	4.59	0.62	9.32	1.37	0.34	192.0	24.4	59.4	104.0
	2S	4.61	0.73	9.17	1.33	0.38	196.2	29.2	83.4	125.0

^z See table 3-25.

이상의 실험 결과에서 볼수 있듯이, 개발된 SCU배양액은 기존에 허브배양액으로 사용된 일본야채시험장 배양액과 비교할 때 생육과 수량면에서 우수하였음을 볼 수 있었다. 또한 근권내 pH와 EC의 변화도 생육에 지장을 줄 정도로 크게 나타나지 않았으며, 딸의 수경재배에 적합한 배양액이라 할 수 있다.

6) 식물공장용 바실 배양액 개발

바실의 수경재배에 적합한 배양액을 조성하기 위하여 일본야채시험장 표준액을 사용하여 4수준의 농도, 즉 1/4배액(1/4 S), 1/2배액(1/2 S), 1배액(1 S), 2배액(2 S)으로 스위트 바실(sweet basil)을 재배하여 양수분 흡수율을 조사하였다(Table 3-28).

일본 야채 시험장 배양액 농도별 스위트 바실의 양수분 흡수율(n/w), 즉 흡수된 물의 단위부피당(w) 흡수된 무기양분($\text{NO}_3\text{-N}$, P, Ca, Mg)의 값(n)은 배양액 농도가 높을수록 높아졌으며 초기 공급된 양분의 양과 흡수된 후의 양분의 양은 그다지 큰 차이를 내지는 않았다. 일정기간 동안의 배양액농도 변화로부터 산출한 양수분 흡수율(n/w)가 초기의 이온 농도보다 높으면 초기의 이온 농도가 저하하고 있음을 의미하며, 그 반대의 경우는 초기의 농도보다 상승되었음을 의미한다. 山崎(1981)는 이 값이 배양초기의 양액농도에 가까운 경우, 작물은 안정된 생육을 나타내는 것이라고 생각하여 여러 종류의 채소에 대해서 최적 배양액조성과 그 농도를 제시하였다.

Table 3-28. Calculated n/w^z values of sweet basil(*Ocimum basilicum* L.) based on the Yamasaki's formula.

Nutrient conc.	Items measured	Water (ℓ)	Items measured	NO ₃ -N (me · L ⁻¹)	PO ₄ -P (me · L ⁻¹)	K (me · L ⁻¹)	Ca (me · L ⁻¹)	Mg (me · L ⁻¹)
1/4 S ^z	a	15.0	y	2.70	1.10	2.28	1.72	0.99
	w	12.9	y ₁	3.36	0.29	2.25	1.32	0.71
	a / w	1.17	n / w^y	2.59	1.23	2.29	1.79	1.03
1/2 S	a	15.0	y	5.34	2.23	4.29	3.71	2.01
	w	12.2	y ₁	3.41	1.83	2.98	4.33	2.32
	a / w	1.23	n / w	5.79	2.33	4.59	3.56	1.94
1 S	a	15.0	y	10.6	3.68	6.39	6.59	3.68
	w	11.8	y ₁	8.50	4.11	8.66	9.71	5.62
	a / w	1.27	n / w	11.2	3.57	5.78	5.76	3.17
2 S	a	15.0	y	19.5	7.41	12.2	12.5	7.77
	w	11.1	y ₁	16.2	10.3	18.7	18.8	11.7
	a / w	1.35	n / w	20.6	6.38	9.90	10.3	6.38

^z Strength of nutrient solution.

^y The formula devised by Yamasaki to determine the amount of macronutrients and water uptake at regular intervals during water culture.

$$y > y_1, \quad n/w = \frac{a}{w} (y - y_1) + y_1$$

$$y < y_1, \quad n/w = y_1 - \frac{a}{w} (y_1 - y)$$

where,

n = nutrient absorpyion,

a = initial volume of culture solution in each tray (liter),

w = the amount of water absorbed by plants (liter),

y = the initial concentration of macronutrients in culture solution (me · L⁻¹), and

y₁ = the final concentration of macronutrients in culture solution (me · L⁻¹).

개발 기간의 근권내 N의 함량은 1/4배액을 제외하고 모든 배양액에서 감소한 반면, Ca, Mg는 증가하는 경향을 나타내었다. P와 K의 함량은 1/4배액과 1/2배액

에서 감소하였으나 1배액과 2배액에서는 증가하는 경향을 보였다.

스위트 바실의 배양액 개발기간 동안의 근권내 pH와 EC의 변화는 그림 7과 같다. 재배기간 동안 근권내 EC는 1/4배액, 1/2배액 및 1배액에서 초기의 공급액 수준으로 안정된 경향을 보인 반면, 고농도인 2배액에서는 재배 후기에 높아지는 경향을 보였다. 이것은 생육이 진전되면서 스위트 바실의 양수분흡수 특성상 흡수하는 이온농도보다 많은 양의 이온이 공급되어 생육이 진전될수록 이온이 근권내에 집적되었기 때문인 것 같다.

한편, 근권내 pH는 처리후 2주동안 급격한 변화를 보였는데 저농도인 1/4배액과 1/2배액에서는 계속 상승하는 경향을 보였고, 1배액과 2배액에서는 낮아지는 경향을 보였다. 그러나, 재배후기로 갈수록 저농도인 1/4배액을 제외하고 그 외 농도구는 적정범위로 보정해준 수준에서 안정되었다. 이러한 배양액의 pH변화는 재배중의 뿌리에 의한 양이온과 음이온의 흡수 차이에 의해 일어나며 이온의 흡수량상은 작물의 종류, 생육정도, 광합성의 강약, 배지의 온도 및 배양액 농도 등에 의해서 달라진다고 밝혀져 있다(位田, 1982; 池田 1983). 位田(1982)는 양액의 농도가 pH의 변화를 조사한 결과, Hoagland액의 농도수준을 달리하여 토마토를 재배하면서 pH의 변화를 조사한 결과, 1배액 이하의 농도구에서는 pH가 높아지기 쉬운 반면 고농도 구에서는 그 변화가 비교적 작았다고 하여 본 실험과 같은 결과를 보고하였다.

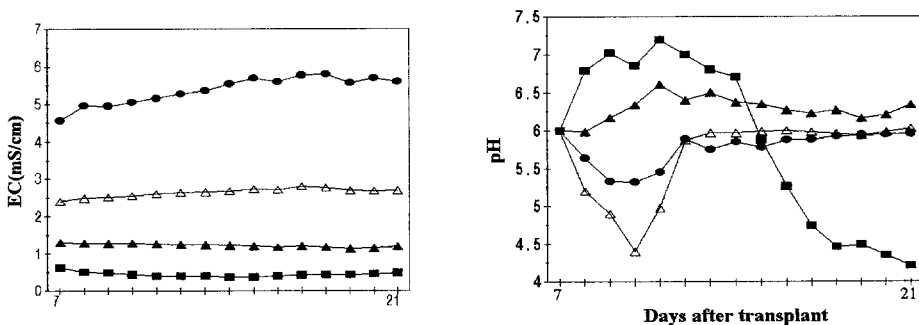


Fig. 3-17. Changes of pH and EC in the nutrient solution depending on the different nutrient concentration. [1/4 S(■), 1/2 S(▲), 1 S(△), and 2 S(●)]

재배초기의 이러한 pH의 변화양상은 앞에서 전술한 바와 같이 저농도에서는 용수의 첨가와 함께 근권내 NO₃⁻ 등의 음이온이 양이온 보다 우선적으로 흡수됨에 따라 낮은 전기전도도로 인한 영향이 신속히 나타난 결과이다. 마찬가지로 고농도 구에서 pH가 감소된 것은 배양액내 양이온인 NH₄⁺와 K⁺ 이온의 흡수가 지속적으로 이루어지면서 상대적으로 음이온보다 많이 흡수되었기 때문인 것으로 생각된다.

배양액 농도에 따른 스위트바실의 생육 및 수량은 Table 3-29와 같다. 전반적으로 일본 야채 시험장 1배액에서 초장, 엽중, 경경, 엽수 및 지상부의 생체중이 다른 농도 구에서 보다 높게 나타나 우수한 생육을 보였다. 특히 주로 이용되는 부위인 잎의 생육량은 1/4배액과 2배액에서 가장 낮게 나타난 반면, 1배액에서 최고의 생육을 보였다.

한편, 지상부의 건물중에 있어서는 처리간에 차이가 인정되지 않았으나 건물율(%)은 1배액에서 가장 낮았으며 2배액에서 가장 높게 나타났다. 이것은 생육의 차이가 수분 흡수의 차이에 의하여 일어난 것을 의미하는데 수분의 흡수가 더 왕성하였을 때 생육도 높았음을 볼 수 있다.

이상의 결과로 생육과 수량이 가장 높았던 일본 야채 시험장 1배액에서 측정된 n/w가 스위트 바실의 정상적인 영양흡수특성에 더 가까운 수치로 판단되었다.

Table 3-29. The effect of nutrient concentrations on the growth of sweet basil at 22days after transplant.

Nutrient conc ^z	Plant height (cm)	Leaf weight (g)	Stem diameter (cm)	No. of leaves/plant	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		Photosynthesis ^y ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
					Shoot	Root	Shoot	Root	
1/4 S	24.1 bc ^x	13.1 b	0.42 c	31.2 b	29.1 b	9.4 c	1.73 a	0.66 ab	17.2 bc
1/2 S	27.9 ab	18.0 a	0.48 b	41.8 ab	37.2 ab	15.1 a	2.12 a	0.74 a	22.5 a
1 S	30.5 a	19.9 a	0.54 a	46.4 a	40.3 a	13.5 ab	2.24 a	0.68 ab	19.2 b
2 S	22.3 c	11.6 b	0.45 bc	33.6 b	29.0 b	10.2 bc	1.78 a	0.57 b	15.9 c

^zConcentration of nutrient solution.

^yMeasured condition : light intensity; 900~1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, RH; 50~55%, CO₂ concentration; 360~390ppm, leaf temp.; 30~33 °C,

^xThe values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test at 5% level.

엽내 무기성분 분석결과, N, P, K, Cu 및 Mn의 함량은 배양액 농도가 높아질수록 증가되는 경향을 보였으나 1배액과 2배액간의 뚜렷한 차이는 나타나지 않았다. 반면에 Ca, Mg 및 Fe의 함량은 1/2배액에서 높게 나타났으나 농도간 비슷한 흡수양상을 나타내었다(Table 3-30).

Table 3-30. Mineral contents in shoot and root of sweet basil grown under different nutrient concentrations at 25 days after transplant.

Nutrient conc. ^z	T-N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
	(%)					(mg · kg ⁻¹)			
- Shoot -									
1/4 S	2.94	0.49	4.14	1.59	0.39	274	6.8	30.2	69.0
1/2 S	3.87	0.76	4.72	2.26	0.42	364	10.6	39.4	65.2
1 S	4.18	0.72	5.02	1.93	0.35	285	11.2	58.6	60.8
2 S	4.87	0.83	5.10	1.55	0.35	332	24.6	66.4	66.6
- Root -									
1/4 S	3.47	0.80	4.13	0.27	0.52	1425	47.4	30.2	138.4
1/2 S	4.58	1.02	5.07	0.47	1.12	1124	20.8	101.6	115.8
1 S	4.59	1.21	4.28	0.66	0.98	2094	18.6	201.6	120.0
2 S	4.65	1.54	4.21	0.97	0.80	2699	27.0	74.4	121.2

^z Concentrations of nutrient solutions.

본 실험에서의 식물체 분석치는 상추, 엔디브 등의 엽채류의 식물체내 영양진단 기준 (中村 등, 1989; Jones와 Wolf, 1991)보다 P, Ca의 함량이 2~2.5배, 미량원소인 Fe의 함량은 5~8배 가까이 높게 나타났다. 이것은 Zhu 등(1997)이 일반적으로 sage, spearmint, lemon balm과 같은 향신채가 무기영양분이 풍부한 작물이라고 하여 이를 입증하고 있다.

뿌리내 다량원소와 미량원소의 함량에 있어서 배양액 농도간 뚜렷한 차이는 나타나지 않았으며 미량원소의 경우 뿌리에 상당량 집적되었다. Marschner(1983)는 체내 무기성분의 이동시 이온간의 길항작용은 주로 뿌리조직이나 식물체의 일부 기관내에서 침전에 의해 나타나기 쉽다고 하였으며, 특히 근권내 P의 과잉은 Zn과 Fe을 불용화시켜 아연결핍, 철결핍에 의한 황화증상을 야기시킨다고 하였다. 그러나 본 실험에서 P 흡수의 증가로 인한 미량원소의 결핍증상은 나타나지 않았지만 뿌리에서의 P의 집적으로 인해 지상부로의 Fe과 Zn의 이동이 덜 이루어졌음을 볼 수 있었다.

이상의 결과, 일본 야채 시험장 1배액에서 생육과 수량이 가장 높았으며 근권내 pH와 EC의 변화도 안정되었으므로 스위트 바실의 양분흡수특성에 적합할 것으로 판단되었다. 따라서, 1배액의 양수분 흡수율(n/w)을 기준으로 새로운 배양액을 조성하였다. 즉 스위트 바실의 최적 이온조성은 $\text{NO}_3\text{-N}$ 8.85, $\text{NH}_4\text{-N}$ 0.55, P 2.10, K 6.20, Ca 2.80, Mg 1.70 $\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$ 이 적합할 것으로 나타났으며 이 표준액(1배액)을 서울시립대 스위트 바실 배양액(SCU)으로 하였다.

-개발 배양액의 적합성 검증

스위트 바실의 양수분 흡수율에 따라 조성하여 순환식 NFT 재배용 배양액으로 개발한 SCU 배양액의 적합성을 검증하기 위하여 기존의 허브 배양액으로 사용된 일본 야채 시험장 표준액(HRS)과 유럽의 채소연구개발센터(European Vegetable R & D Center)에서 개발된 허브전용 배양액(EVR) 및 식물체 분석자료에 기초하여 조성한 배양액(PA)을 사용하여 비교실험을 수행하였다.

SCU액은 다시 3수준의 농도(1/2, 1, 2배액)로 조성하여 실험을 수행하였으며, PA액은 생육량이 가장 높았던 1배액에서의 식물체 분석치, 즉 건물 1 g에 대한 각 이온의 질량(%)을 실제 양액조성에 사용되는 me단위로 환산하여 Mg을 기준으로 하여 다량원소의 조성비를 결정한 것이다. 실험에 사용된 배양액의 무기성분 조성은 Table 3-31과 같다.

Table 3-31. The composition of SCU, PA, HRS, and EVR nutrient solution for sweet basil in hydroponics.

Nutrient solution ^z	Nutrient concentration (me · L ⁻¹)					
	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg
SCU	11.6	1.2	3.6	5.8	5.8	3.0
PA	8.4	1.2	2.4	4.5	3.5	1.0
HES	16.0	1.3	4.0	8.0	8.0	4.0
EVR	10.1	0.5	5.4	5.4	4.8	2.0

^z SCU; The nutrient solution devised by The University of Seoul.

PA; The nutrient solution devised by the plant analysis.

HES; The nutrient solution of Horticultural Experiment Station in Japan.

EVR; The nutrient solution of European Vegetable R & D Center.

새로 개발된 SCU 배양액과 PA, HES 및 EVR 배양액을 사용하여 스위트 바질을 재배하였을 때 근권내 EC와 pH 변화는 Fig. 3-18, 19와 같다.

근권내 pH는 모든 배양액에서 정식후 계속 감소되다가 7일째 다시 높아지는 경향을 나타내었다. 배양액 개발기간 동안 저농도를 제외한 농도구에서의 pH 변화도 유사하게 나타났는데 이것은 앞에서 전술한 바와 같이 NH₄⁺ 등의 양이온을 우선적으로 흡수하면서 일시적으로 pH가 낮아졌다가 어느정도 NH₄⁺의 흡수가 이루어지고 나면 NO₃⁻를 흡수하면서 pH 상승단계로 전환하기 때문이다.

재배기간동안 근권내 EC 변화는 전 생육기간동안 비교적 안정되었으나 SCU 2S와 HES액에서는 약간의 변화폭이 나타났다. 이러한 EC의 변화는 고온기에 실험이 이루어졌기 때문으로 볼 수 있다. 즉, 작물에 의한 양분의 흡수보다 수분의 흡수 및 수면으로 부터의 증발이 더 왕성하였기 때문에 줄어든 양만큼의 물과 양분의 첨가에 의한 결과로 볼 수 있다.

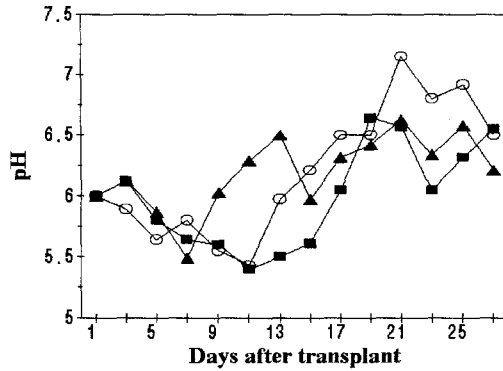


Fig. 3-18. Changes of pH in the nutrient solutions over time.[EVR(▲), SCU 1 S(○), HES(■)]

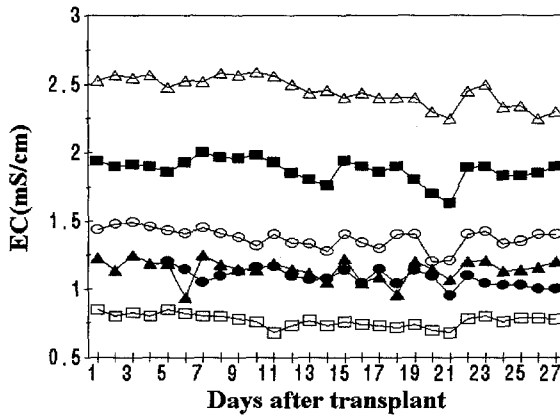


Fig. 3-19. Changes of EC in the nutrient solutions over time. [EVR(▲), SCU 1 S(○), HES(■), SCU 1/2 S(□), SCU 2 S(△), and PA(●)]

PA · HES · EVR 배양액 및 SCU 배양액의 1/2 배액, 1배액, 2배액으로 NFT 방식으로 재배하면서 재배기간동안 네 차례에 걸쳐 배양액을 채취하여 배양액 내의 무기성분 농도를 측정하였다(Fig. 3-20, 3-21).

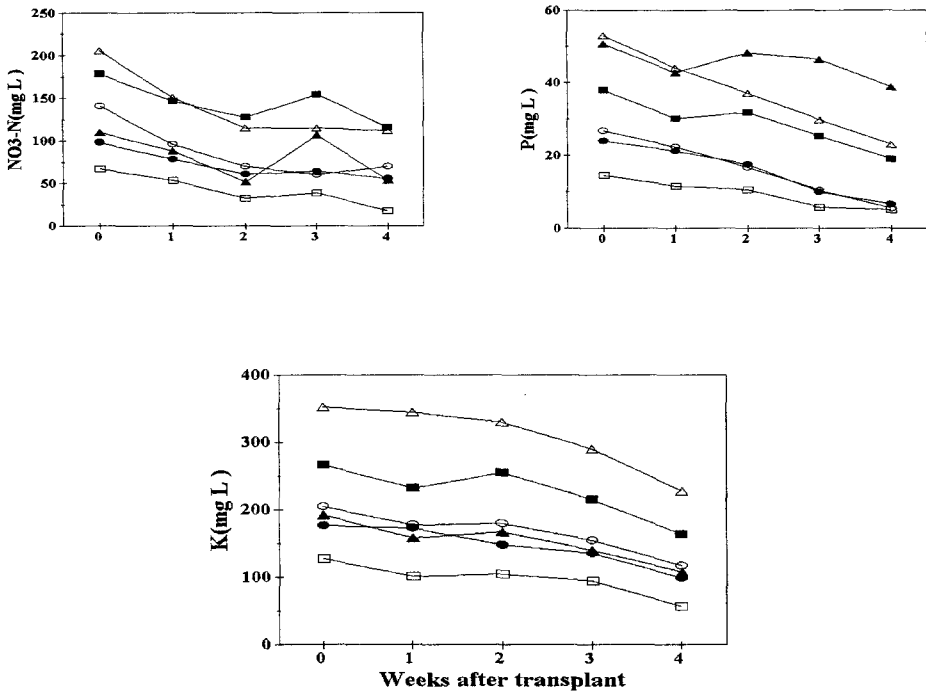


Fig. 3-20. Changes of NO₃-N, P and K concentrations in the nutrient solutions.

[EVR(▲), SCU 1 S(○), HES(■), SCU 1/2 S(□), SCU 2 S(△), and PA(●)]

처리 후 4주동안의 근권내 N, P 및 K의 함량은 모든 배양액에서 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 N는 모든 배양액에서 처리 후 2주동안 계속 감소하는 경향이 뚜렷하였으며 개발된 SCU 배양액과 식물체 분석에 의해 조성된 PA배양액의 K와 P의 흡수패턴이 거의 유사하였음을 볼수있었다. 일반적으로 K와 P의 흡수는 광도와 근권온도와 깊은 관련이 있다고 알려져 있다(Adams와 Smith, 1993). 본 실험에서의 근권내 K와 P의 감소도 고온기에 실험이 수행된 것에 어느정도 영향을 받은 것으로 보인다. 반면 근권내 Ca과 Mg은 SCU 2 S를 제외한 모든 배양액내에서 초기의 공급액과 거의 비슷한 적정수준으로 유지되는 경향을 보였다. 그리고 미량원소중 Fe은 HES 배양액과 SCU 2S를 제외한 모든 배양액내에서 감소하는 경향을 나타내었는데 특히 EVR액에서는 처리 1주후 0.1 ppm이하로 떨어졌다.

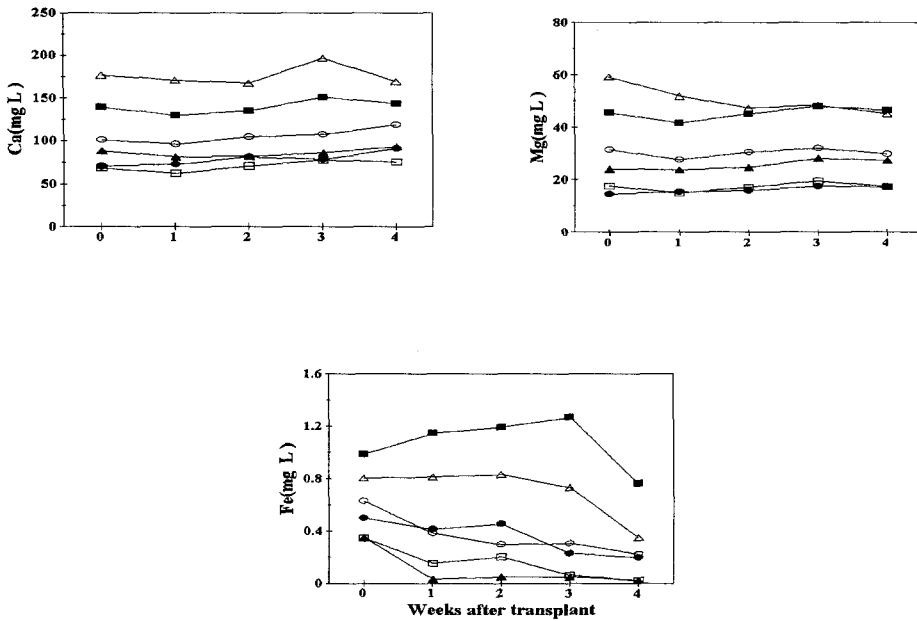


Fig. 3-21. Changes of Ca, Mg and Fe concentrations in the nutrient solutions. [EVR(▲), SCU 1 S(○), HES(■), SCU 1/2 S(□), SCU 2 S(△), PA(●)]

嶋田(1989)은 실제 작물의 종류와 생육단계, 혹은 여러 가지 환경요인에 따라 양분흡수에 미치는 영향이 다르기 때문에 유식물에서부터 수확기까지 일정한 조성의 배양액으로 적용시키기는 어렵다고 하였다. 따라서 배양액이 순환되는 동안 작물의 생육단계에 따라 성분들이 소모되고 배지내 집적되는 것을 규명하여 근권의 최적 배양액이 조성하는 것이 필요하다.

따라서, 본 실험결과에서 볼 수 있듯이 스위트 바실의 추비용 배양액은 N, P, K 및 Fe의 함량을 늘이고, Ca와 Mg의 함량은 초기 공급액의 수준으로 유지하는 것이 바람직하며, 앞으로 추비용 배양액 조성시 참고하여야 할 것으로 나타났다.

정식 24일 후 배양액 종류와 농도에 따른 작물의 생육을 보면, 초장은 SCU 1배액에서 가장 높았으며 SCU 1/2배액에서 가장 낮게 나타났다. 지상부의 생체중량은 SCU 1배액과 HES 1배액에서 가장 높게 나타났으며 식물체 분석에 의해 조성된 PA배양액에서도 전체적인 생육량이 높게 나타났음을 볼 수 있다(Table 3-32).

Table 3-32. Effects of nutrient solutions and concentrations on the growth of sweet basil at 24 days after transplant.

Nutrient solution ^z	Nutrient coc.	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf weight (g/plant)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
						Shoot	Root	Shoot	Root
SCU	1/2 S	39.8 c	14.4	7.70 b	30.6 b	48.6 b	12.0 b	3.76 c	0.95 b
	1 S	52.6 a	15.8	7.98 a	37.8 ab	60.3 a	16.5 a	4.79 a	1.25 a
	2 S	47.2 b	15.1	8.10 a	36.8 ab	54.1 ab	16.0 a	3.96 bc	1.07 ab
PA	1 S	51.3 ab	14.4	8.27 a	36.3 ab	55.5 ab	16.1 a	4.68 a	1.24 a
HES	1 S	48.8 ab	15.0	8.02 a	38.6 a	59.0 a	15.3 a	4.48 ab	1.00 ab
EVR	1 S	48.4 ab	15.2	8.08 a	36.9 ab	58.0 ab	15.8 a	4.49 ab	1.01 ab

^z See table 2-31.

^y The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test at 5% level.

Table 3-33. Effects of nutrient solutions and concentrations on the growth of sweet basil at 34 days after transplant.

Nutrient solution ^z	Nutrient coc.	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		Photo-synthesis ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) ^x
					Shoot	Root	Shoot	Root	
SCU	1/2 S	48.5 c ^y	14.7 ab	7.78 ab	94.6 bc	29.5 ab	8.23 bc	0.94 c	14.1 b
	1 S	52.2 bc	15.5 a	8.60 a	117.9 a	30.9 a	10.3 a	1.58 b	15.9 ab
	2 S	51.7 bc	13.7 b	7.10 b	80.7 c	24.3 bc	6.89 c	2.37 a	14.4 bc
PA	1 S	58.4 a	14.0 ab	8.24 ab	94.8 bc	23.4 c	8.62 abc	1.77 b	15.6 ab
HES	1 S	53.6 b	13.4 b	7.34 b	98.5 bc	30.0 ab	8.90 ab	0.99 c	14.3 bc
EVR	1 S	50.4 bc	14.6 ab	8.08 ab	112.2 ab	31.5 a	10.2 a	1.70 b	17.3 a

^z See table 2-31.

^y The values followed by the some letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test at 5% level.

^x Measured condition :

light intensity; 650~700 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, CO₂ concentration;360~390ppm, leaf temp.; 32~35°C, RH; 45~50%.

정식 34일 후의 생육조사결과, 초장·엽장 및 엽폭 등은 SCU 1배액과 EVR 배양액에서 가장 높았으며 특히 SCU 1배액에서 스위트 바실의 주요 이용 부위인 지상부의 생체중과 건물중이 다른 배양액과 농도처리보다 높게 나타났다. 또한 광합성 효율은 생육량이 높았던 SCU 1S와 EVR 및 PA 배양액에서 높게 나타났다. 반면 식물체 분석치에 의해 조성된 PA 배양액은 후기생육이 초기생육에 비해 다소 떨어지는 경향을 보였다.

각각 다른 배양액에서 재배된 스위트 바실의 엽내 무기성분은 배양액 종류에 따라 흡수량상의 차이가 뚜렷하게 나타나지는 않았으나 미량원소 Fe과 Cu의 함량은 다른 배양액에서 보다 SCU 1 S에서 높게 나타났다. 이 분석치는 상추의 영양진단 기준(Jones, 1991)보다 5~7배 이상 높은 수준이었다. SCU 배양액의 농도별 엽내 함량은 배양액 농도가 높을수록 P, K 함량이 증가되었고 N, Ca 및 Mg 함량은 농도에 따른 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 미량원소에 있어서 Fe, Cu 및 Zn은 SCU 1 S에서 가장 높게 나타났다.

Table 3-34. Mineral contents in leaves of sweet basil grown under different nutrient solutions at 34 days after transplant.

Nutrient solution ^z	Nutrient conc	T-N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
		(%)					(mg · kg ⁻¹)			
SCU	1/2S	3.29	0.57	3.76	1.86	0.311	280	27.8	45.6	101.4
	1S	3.33	0.75	4.25	1.76	0.303	380	35.6	56.0	150.4
	2S	3.38	0.76	4.54	1.72	0.297	300	30.2	68.6	88.0
PA	1S	3.36	0.76	4.05	1.77	0.244	234	28.0	99.8	122.4
HES	1S	3.16	0.82	4.75	1.56	0.291	311	26.6	64.2	81.0
EVR	1S	3.05	0.80	3.92	1.86	0.291	237	30.0	124.0	174.8

^z See table 2-31.

이상의 결과에서 스위트 바실의 수경재배용으로 개발한 SCU 배양액은 근권내 EC, pH 및 무기성분 농도의 변화가 비교적 적었다. 또한 기존에 개발된 EVR 배양액, HES 배양액 및 PA 배양액과 생육과 수량을 비교했을 때 우수한 성적을 나타내었다. 따라서 본 실험에서 스위트 바실의 수경재배 배양액으로 개발한 시립대

배양액(SCU)은 스위트 바실의 수경재배에 충분히 이용할 수 있는 배양액으로 나타났다.

나. 병용형 식물공장의 과채류 최적 근권환경

1) 토마토 순환식 배지경에 적합한 배양액 개발

Table 3-35. Calculated n/w value of tomato based on the Yamasaki's formula.

Growth Stage	Nutr. conc.	Items measured	Water (L)	Items measured	PO ₄ -P	K	Ca	Mg
					me · L ⁻¹			
Seedling	1/2 S	a	27.0	y	1.49	3.68	3.65	1.89
		w	33.74	y ₁	1.34	1.89	3.19	1.53
		a / w	0.8	n / w	1.46	3.32	3.59	1.82
	1S	a	27.0	y	3.28	7.37	7.34	3.72
		w	28.29	y ₁	2.44	5.99	8.30	4.45
		a / w	0.95	n / w	3.24	7.30	7.39	3.76
Vegetative	1/2 S	a	27.0	y	1.49	3.68	3.65	1.89
		w	18.92	y ₁	2.33	3.07	4.23	2.05
		a / w	1.43	n / w	1.13	3.94	3.4	1.82
	1S	a	27.0	y	3.28	7.37	7.34	3.72
		w	19.6	y ₁	3.56	6.97	7.0	3.90
		a / w	1.38	n / w	3.3	7.92	7.47	3.44
Reproductive	1/2 S	a	27.0	y	1.64	3.13	3.70	1.12
		w	57.45	y ₁	1.59	3.08	3.8	2.45
		a / w	0.47	n / w	1.61	3.10	3.75	1.87
	1S	a	27.0	y	3.61	6.30	7.40	4.1
		w	51.92	y ₁	2.43	7.98	4.80	3.9
		a / w	0.52	n / w	3.0	7.10	6.15	3.0

n/w : The formula devised by Yamasaki to determine the amount of macro nutrients and water uptake at regular intervals during substrate culture.

$$\text{If } y > y_1, n/w = \frac{a}{w} (y - y_1) + y_1 ; y < y_1, n/w = y_1 - \frac{a}{w} (y_1 - y)$$

S: The nutrient solution of Horticultural Experiment Station in Japan.

a: Initial volume of culture solution in each tray (liter).

w: The amount of water absorbed by plants (liter).

y: The initial concentration of macronutrients in culture solution (me/ℓ).

y₁: The final concentration of macronutrients in culture solution (me/ℓ).

토마토의 순환식 고행배지경에 적합한 배양액 조성 및 농도를 알아보기 위하여 육묘기, 영양생장기 및 결실기로 나누어 양수분 흡수량을 조사했을 때, 전체적으로 초기에 공급된 근권내 양분의 양과 양수분흡수율(n/w)에 의해 흡수된 양분의 양이 큰 차이를 나타내지 않았다. 특히 P은 생육단계에 무관하게 양수분 흡수율이 초기공급액과 거의 같은 수준을 나타내어 전 생육기간 동안 토마토 식물체에 의해 줄곧 요구되어지는 원소라는 것을 알 수 있다. K은 육묘기보다 영양생장기 및 결실기에 이르면서 흡수율이 증가하는 경향을 보였고 Ca은 결실기에 1 배액에서 양수분흡수율이 감소되는 경향을 보였고 Mg도 역시 영양생장기와 결실기의 1 배액에서 후기로 갈수록 점차 감소되었다. 이상의 결과에서 P와 K는 영양생장기에서 결실기에 이르기까지 공급된 양분의 양만큼 식물이 흡수한 것으로 판단할 수 있고 Ca, Mg은 생육이 진전됨에 따라 양수분 흡수율이 차츰 감소된다는 것을 알 수 있다.

재배기간동안 근권내 배양액의 pH와 EC 변화를 보면, pH는 1/2배액에서 생육 초기에 높아지는 경향을 보이다가 후기로 갈수록 점차 안정되었다. 한편, 1배액에서는 pH가 낮아지다가 점차 안정되는 경향을 보였다(Fig. 3-22). 배양액의 전기전도도는 1/2 배액에서 안정된 반면에 1배액에서는 생육후기로 갈수록 높아지는 경향을 보였다(Fig. 3-23).

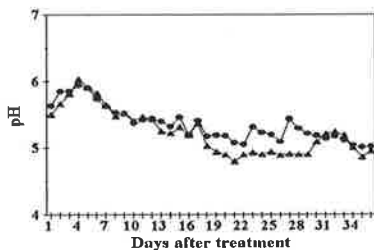


Fig. 3-22. Changes of pH in root zone as affected by the different nutrient strength in perlite substrate [pH: 1/2 S (●), 1 S (▲)].

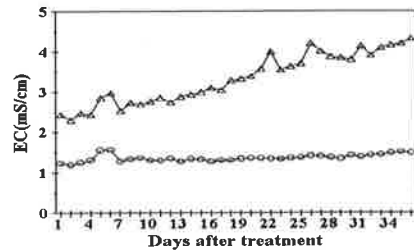


Fig. 3-23. Changes of EC in root zone as affected by the different nutrient strength in perlite substrate [EC: 1/2 S (○), 1 S (△)].

1배액에서 pH가 증가되다가 다시 낮아진 것은 전술한 바와 같이 배양액내에서 NO_3^- 이온이 우선적으로 흡수되면서(Ikeda, 1981) 일시적으로 pH가 증가되다가 NO_3^- 이온의 흡수가 다 이루어지고 나면 K 이온을 중심으로 한 양이온 흡수가 음이온보다 지속적으로 많이 이루어져서 배액내에 양이온과 음이온의 비가 1내외가 되기 때문으로 추정된다. 또한 1배액에서 EC가 증가된 것은 양액이 순환되면서 후기로 갈수록 흡수된 이온보다는 많은 양의 이온이 근권내에 집적되었기 때문으로 생각되어진다.

배양액 농도에 따른 토마토의 생육 및 수량은 Table 3-36과 같다. 전반적으로 1배액에서 생육, 상품과수 및 상품수량이 높게 나타났다. 이것은 근권내 pH, EC 변화폭이 작았기 때문에 작물의 양수분 흡수패턴이 일정하게 유지되었던 것에 기인하는 것으로 생각된다.

Table 3-36. Effects of different nutrient strength on the growth and yield of tomato plants using the nutrient solution of National Horticultural Research Station in Japan.

Nutrient Conc.	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Stem diameter (mm)	No. of fruits (No/plant)	Fruit weight (g/fruit)	Soluble solid content (°Brix)
½S	215.0 b	44.3 b	48.5 b	9.33 a	14.0 a	164.3 b	5.63 b
1 S	227.3 a	50.3 a	53.8 a	9.33 a	14.0 a	202.2 a	6.97 a

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

따라서, pH 및 EC가 안정적이고 생육이 높았던 1배액의 양수분흡수율을 선택하여 생육단계별로 개발된 토마토 고품배지경용·순환식 배양액을 조성하였다. 육묘기 동안에는 N 13.5, P 3.3, K 7.0, Ca 7.0, 및 Mg 3.5 $\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$, 영양생장기 동안에는 N 14.2, P 3.3, K 8.0, Ca 7.5, 및 Mg 4.0 $\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$, 결실 비대기에는 N 10.0, P 3.0, K 7.0, Ca 6.0, 및 Mg 3.0 $\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 조성한 것이 적합한 것으로 나타났다.

이렇게 조성된 배양액을 서울시립대 고품배지경용 순환식 토마토 배양액(SCUT)으로 하였다.

-개발 배양액의 적합성 평가

본 실험에서 토마토 고품배지경용 순환식 배양액으로 개발된 서울시립대 토마토 배양액(SCUT)의 적합성을 검정하기 위하여 화란온실작물연구소에서 개발한 토마토 암면 재배용 순환식 배양액(PBG)과 비교실험을 실시하였다.

PBG 배양액과 새로 개발된 SCUT 배양액을 사용하여 토마토를 재배했을 때 근권내 EC와 pH 변화는 그림 3과 같다. 전체적으로는 두 배양액 모두 1/2배액에서 변화의 폭이 컸는데 특히 생육초기에 그 변화의 폭이 컸고 점차 안정되는 경향을 보였다. 근권내 EC의 변화는 두 배양액 모두 1/2배액과 1배액에서는 전 생육기간 동안 안정된 경향을 보였고 2배액에서는 점차 증가되는 경향을 보였다. 佐佐木二(1982)도 pH와 EC가 점차 안정된 것은 양이온과 음이온의 흡수가 균형을 이루었기 때문이라고 하여 이를 입증하고 있다. 생육초기에 근권내 pH의 변화가 나타난 것은 토마토 식물체가 생육초기에 수분흡수보다 양분흡수, 특히, 음이온인 $\text{NO}_3\text{-N}$ 을 빠르게 흡수하였기 때문이나 점차 무기이온의 흡수가 균형을 이루면서 안정된 것으로 보인다.

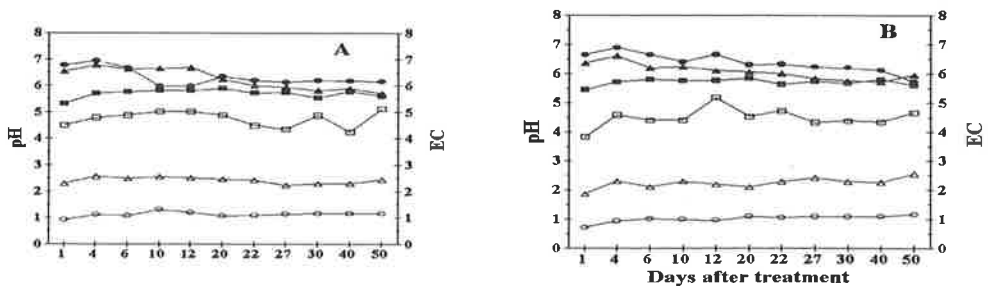


Fig. 3-24. Changes of pH and EC in root zone as affected by the different strength and nutrient solution [SCUT (A) pH : 1/2 S (●), 1 S (▲), 2 S (■), PBG (B) EC : 1/2 S (○), 1 S (△), 2 S (□)].

순환식 배양액인 PBG 와 SCUT 배양액의 1/2, 1, 2배액으로 토마토를 재배하면서 일주일 간격으로 배액을 채취하여 다량원소의 농도를 측정하였다(Fig. 25~29). 두 배양액 모두 1/2배액에서는 질소와 인의 함량이 너무 낮게 유지되어 생육저하

의 원인이 될 수 있음을 보여주었고 2배액에서는 N, K, Ca, Mg이 생육후기에 뚜렷하게 집적되는 것으로 나타났다. 반면에 1배액에서는 근권내 무기원소함량이 적정수준을 유지하는 것으로 나타났다.

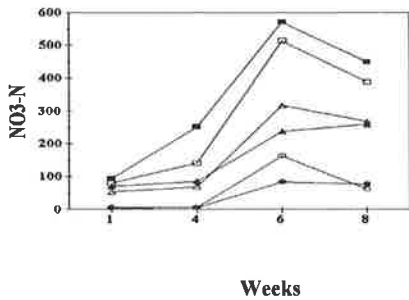


Fig. 3-25. Changes of N concentration($\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$) in root zone based on different composition and strength of nutrient solution.

[SCUT: 1/2 S (●), 1 S (▲), 2 S (■),
PBG: 1/2 S (○), 1 S (△), 2 S (□)].

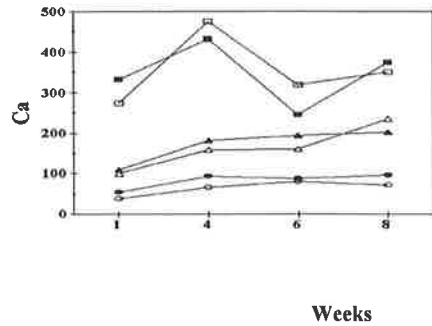


fig.3-26. Changes of Ca concentration($\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$) in root zone based on different composition and strength of nutrient solution.

[SCUT: 1/2 S (●), 1 S (▲), 2 S (■),
PBG: 1/2 S (○), 1 S (△), 2 S (□)].

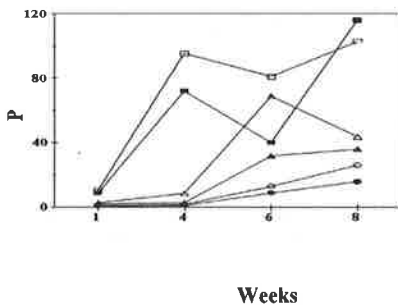


Fig. 3-27. Changes of P concentration($\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$) in root zone based on different composition and strength of nutrient solution.

[SCUT: 1/2 S (●), 1 S (▲), 2 S (■),
PBG: 1/2 S (○), 1 S (△), 2 S (□)].

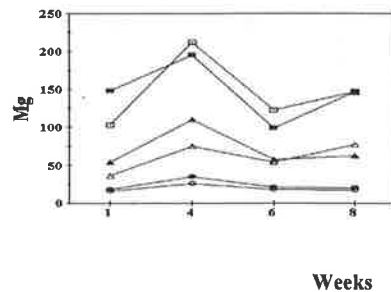


Fig. 3-28. Changes of Mg concentration($\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$) in root zone based on different composition and strength of nutrient solution.

[SCUT: 1/2 S (●), 1 S (▲), 2 S (■),
PBG: 1/2 S (○), 1 S (△), 2 S (□)].

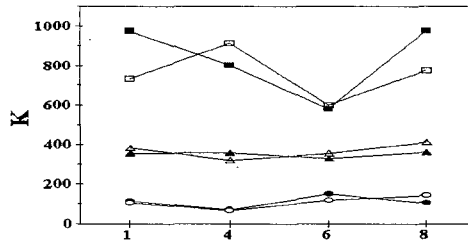


Fig. 3-29. Changes of K concentration($\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$) in root zone based on different composition and strength of nutrient solution. [SCUT: 1/2 S (●), 1S (▲), 2 S (■), PBG: 1/2 S (○), 1 S (△), 2 S (□)].

정식 70일후 생육은 SCUT 1배액에서 왕성하게 나타났다. 특히 경경, 생체중 및 건물중이 SCUT배양액의 1배액에서 높았고 광합성 속도도 높게 나타났다(Table 3-37).

이와 같은 결과는 식물체가 1배액에서 정상적인 생육을 하기에 충분한 근권내 무기양분을 유지하여 식물체내에 영양분 결핍과 과잉을 막게 되어 왕성한 생육을 하였다는 것을 보여주었다.

Table 3-37. Effects of two nutrient solutions on the growth and yield of tomato (var. Gambok) in closed growing system at 70 days after transplanting.

Nutrient solution	Nutrient conc.	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Stem diameter (mm)	Fresh weight		Dry weight		Photo synthesis ($\text{CO}_2/\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
						Leaf (g)	Stem (g)	Leaf (g)	Stem (g)	
PBG	1/2S	186	44.9	46.7	13.6	332	214	42.7	35.3	10.62
	1S	161	48.9	48.5	15.3	544	268	61.5	39.4	12.65
	2S	179	49.3	56.7	15.2	576	268	76.5	39.8	10.82
SCUT	1/2S	166	44.0	50.0	15.8	489	255	58.7	35.8	10.30
	1S	171	50.6	53.8	17.2	600	313	72.2	45.6	17.27
	2S	180	47.3	51.1	16.6	557	292	66.6	42.5	7.30
Significance										
Nutrient Conc.		NS	**	NS	NS	**	NS	**	NS	**
Nutrient solution		NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS
Conc. × solution		NS	NS	NS	**	**	NS	**	NS	**

NS,*,** Nonsignificant or significant at $P < 0.05$ or 0.01 , respectively. The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

두 배양액에서 토마토의 수량은 전체적으로 2배액보다 1배액에서 높게 나타났으나 품질과 직결되는 과실의 당도 및 산 함량은 2배액에서 더 높은 것으로 나타났다. 과실의 과중이 적어지더라도 품질을 좋게 하려면 고농도로 재배할 필요가 있다는 것을 보여주고 있다. 당도 및 산도는 전체적으로 SCUT 배양액에서 PBG 배양액보다 높게 나타났고 두 순환식 배양액 모두 1배액 이상에서 당도 및 산도가 높게 나타났다.

실제 Ohta등(1991)도 각기 다른 배양액 농도가 방울토마토의 상품성에 미치는 영향에 관한 실험에서 표준농도의 1.5 배나 2.0 배로 배양액 농도가 증가함에 따라 과실의 당도 및 적정산도는 성숙전 단계와 완숙단계 사이에서 증가하여 과실의 품질이 향상되었다고 보고하여 본 실험과 일치되었다.

Table 3-38. Effect of two nutrient solutions on the qualities of tomato fruits (var. Gambok) in closed system.

Nutrient solution	Nutrient conc.	Fruit weight (kg · plant ⁻¹)	Soluble solid content(A) (°Brix)	Citric acid (B) (mg · mL ⁻¹)	A/B	BER ^z (%)
PBG	1/2S	1.5	5.17	0.96	5.38	0
	1S	1.9	5.87	0.98	5.99	0
	2S	1.7	6.20	1.15	5.40	1.03
SCUT	1/2S	2.1	5.20	0.80	6.50	0
	1S	2.3	6.0	1.13	5.31	0
	2S	1.4	6.73	1.24	5.43	0.7
Significance						
Nutrient Conc.		**	NS	**	**	
Nutrient solution		**	**	**	**	
Conc. × Solution		**	**	**	**	

^z : blossom-end rot per plant

NS,*,** Nonsignificant or significant at P < 0.05 or 0.01, respectively. The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P < 0.05).

2) 오이 순환식 배지경에 적합한 배양액 개발

오이 순환식 고품배지경에 적합한 배양액 조성 및 농도를 알아보기 위하여 일본 야채 시험장 (National Horticultural Research Station in Japan) 표준액을 이

용하여 세 수준의 농도, 즉 1/2 배액 (1/2 S), 1 배액 (1 S) 및 3/2 배액 (3/2 S)으로 오이를 재배하면서 양수분흡수율 (n/w)을 조사하였다 (표 19). 영양 생장기와 생식 생장기로 나누어 양수분흡수율을 조사하였을 때, PO₄-P, Ca 및 Mg는 두 생장기간 동안 양수분흡수율의 차이가 없었지만 K는 영양 생장기보다 생식 생장기에 1/2 배액과 1 배액에서 감소하는 경향을 보였다.

Table 3-39. Calculated n/w values of cucumber plants based on the Yamasaki's formula in substrate culture.

Growth stage	Nutrient conc.	Items measured	Water (ℓ)	Items measured	PO ₄ -P	K	Ca	Mg
					(me·ℓ ⁻¹)			
Vegetative stage	1/2 S ^z	a	20.0	y	1.81	3.61	2.39	1.94
		w	24.95	y ₁	1.02	2.60	2.32	3.94
		a / w	0.802	n / w ^y	1.65	3.41	2.38	2.34
	1 S	a	20.0	y	3.40	6.34	4.43	3.64
		w	20.35	y ₁	2.50	5.91	5.40	4.21
		a / w	0.983	n / w	3.38	6.33	4.44	3.65
	3/2 S	a	20.0	y	5.48	12.4	6.60	6.14
		w	26.85	y ₁	4.30	5.22	8.02	8.20
		a / w	0.745	n / w	5.18	10.6	6.96	6.66
Reproductive stage	1/2 S	a	20.2	y	1.81	3.61	2.39	1.94
		w	38.1	y ₁	1.18	0.78	2.46	1.58
		a / w	0.524	n / w	1.51	1.49	2.42	1.77
	1 S	a	20.0	y	3.40	6.34	4.43	3.64
		w	29.4	y ₁	3.59	2.30	5.27	3.64
		a / w	0.680	n / w	3.46	5.05	4.70	3.64
	3/2 S	a	20.0	y	5.48	12.4	6.60	6.14
		w	19.6	y ₁	6.67	6.95	9.79	12.0
		a / w	1.020	n / w	5.46	12.5	6.53	6.02

^z Strength of nutrient solution

^y The formula devised by Yamasaki to determine the amount of macronutrients and water uptake at regular intervals.

$$y > y_1, n/w = \frac{a}{w} (y - y_1) + y_1$$

$$y < y_1, n/w = y_1 - \frac{a}{w} (y_1 - y)$$

n; nutrient absorption

a; Initial volume of culture solution in each container (ℓ).

w; The amount of water absorbed by plants (ℓ).

y; The initial concentration of macronutrients in culture solution (me·ℓ⁻¹).

y₁; The final concentration of macronutrients in culture solution (me·ℓ⁻¹).

근권내 EC와 pH 변화는 세 가지 수준의 농도처리 모두에서 재배기간 동안 대체로 안정된 경향을 보였다 (Fig. 3-30). 근권내 EC는 1/2 배액 < 1 배액 < 3/2 배액 순으로 높았으며 pH는 저농도인 1/2 배액에서 가장 높았으며 3/2 배액으로 갈수록 낮아졌다. 1/2 배액과 1 배액에서는 EC가 일정하게 유지되는 경향을 보였지만 3/2 배액에서는 재배 후기에 EC가 차츰 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이것은 오이 순환식 고품배지경에서 높은 농도의 배양액이 공급됨으로써 작물이 흡수하는 이온보다 많은 양의 이온이 배양액 내에 집적되어 EC가 높아진 것으로 보인다. 안과 이 (1991)는 미나리를 1/2 배액, 1 배액 및 3/2 배액으로 농도를 달리하여 수경 재배했을 때 1/2 배액과 1 배액에서는 EC의 변화폭이 작았으며 3/2 배액에서는 EC가 높아졌다고 보고하여 본 실험과 같은 경향을 보였다.

山崎 (1981)는 n/w에 의해 조성된 배양액은 재배기간 중에 농도가 거의 변하지 않으며 약간의 변화가 생겨도 해당 조성이나 농도의 배양액을 보충하여 주면 대부분의 경우 다시 안정된다고 하였다. 본 실험에서도 실험기간 동안 EC와 pH가 안정된 것을 관찰할 수 있었다.

배양액의 pH는 8월 9일에 갱신하였기 때문에 모든 농도구에서 8월 9일 이후로 낮아졌는데 (Fig. 3-30), 1/2 배액과 1 배액은 갱신 후 낮아졌다가 다시 높아진 반면에 3/2 배액은 계속 낮아졌다. 1/2 배액과 1 배액에서 pH가 낮아지다가 다시 증가한 것은 일본 야채 시험장 표준액이 P 급원으로 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 를 사용하는 관계로 오이가 배양액내 NH_4^+ 이온을 우선적으로 흡수하면서 일시적으로 pH가 낮아지지만 NH_4^+ 흡수가 이루어지고 나면 NO_3^- 를 급속히 흡수하면서 pH 상승 단계로 전환되기 때문으로 보인다. 반면에 3/2 배액에서 pH가 서서히 낮아지는 경향을 보인 것은 배양액내 양이온인 NH_4^+ 와 K^+ 이온의 흡수가 지속적으로 이루어지면서 나타난 것으로 보인다. 山崎 (1984)도 일본 야채 시험장 표준액을 1/2 배액, 1 배액 및 3/2 배액으로 조제하여 실험했을 때 배양액의 농도가 낮을수록 pH가 높아진다고 하였으며, 이러한 pH의 상승은 용수의 pH가 7.3~7.5로 높고 배양액 농도가 낮을수록 그 영향이 크기 때문에 서서히 추비를 하면 모두 약간 저하된다고 하였다. 또한, 안과 이 (1991)도 일본 야채 시험장 표준액을 1/2

배액, 1 배액 및 3/2 배액으로 하여 미나리를 수경 재배했을 때 pH는 1/2 배액과 1 배액에서 변화폭이 작았으며 3/2 배액에서는 생육이 진전됨에 따라 저하되는 것을 볼 수 있다고 하여 본 실험 결과와 유사한 결과를 보여 주었다.

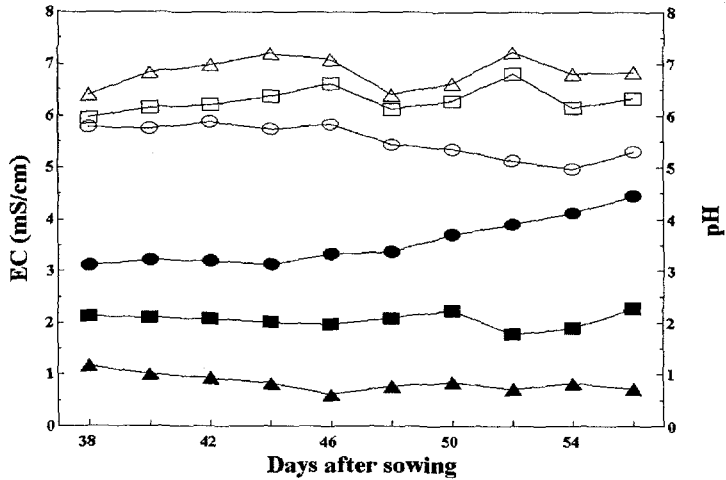


Fig. 3-30. Changes of EC and pH in root zone based on the different nutrient concentrations

[EC; 1/2 S (▲), 1 S (■), 3/2 S (●), pH; 1/2 S (△), 1 S (□), 3/2 S (○)].

세 가지 수준의 배양액 농도가 오이의 생육 및 수량에 미치는 영향을 보면 Table 3-40과 같다. 오이의 초장은 배양액 농도를 높임에 따라 짧아졌으며 엽장, 엽폭 및 엽수는 처리 배양액 농도간에 별로 차이가 없었으나 상품과수와 상품수량은 1 배액에서 가장 많았다. 상품수량은 3/2 배액에서 1/2 배액이나 1 배액에 비하여 매우 낮은 결과를 보여 주었다. 이것은 고온기에 실험을 수행한 결과 고농도 배양액에서 생육 및 수량이 낮게 나타난 것으로 보인다.

Table 3-40. Effects of different nutrient concentrations on the growth and the early yield of cucumber plants using the nutrient solution of National Horticultural Research Station in Japan.

Nutrient Conc.	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	No. of leaves	No. of Marketable fruits	Marketable yield (g/plant)
1/2 S	334 a ^z	10.2 a	23.9	33.9 b	36.5	10 a	1807 b
1 S	322 b	10.2 a	25.2	35.9 a	36.0	13 a	1911 a
3/2 S	310 c	9.1 b	24.6	34.0 b	36.0	10 b	1360 c

^zThe values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

일본 야채 시험장 표준액을 1/2 배액, 1 배액 및 3/2 배액의 세 가지 농도로 하여 오이를 재배한 후 오이 잎과 과실내의 무기성분 함량을 측정하였다 (Table 3-41). 엽내 P 함량은 배양액 농도가 높을 수록 높아졌으며, Ca와 Mg 함량은 낮아졌다. N과 K 함량은 1 배액에서 가장 높게 나타났다. 과실내 N, P, K 및 Mg 함량은 1 배액에서 가장 높았으나 Ca 함량은 1 배액에서 1/2 배액과 3/2 배액보다 낮았다. 오이의 엽내 적정 무기성분 함량은 N 2.5~3.5 %, P 0.2~1.0 %, K 3.5~4.5 %, Ca 2.5~4.5 %, Mg 0.6~1.0 %인 것으로 판단된다 (中村과 渡部, 1989; De Kreij 등, 1990; Jones 등, 1991). 이 자료를 기준으로 본 실험에서 측정된 엽내 무기성분 함량을 평가하면, 엽내 P, Ca 및 Mg 함량은 세 가지 농도에서 모두 적정 함량을 나타냈지만, N은 1 배액과 3/2 배액, K는 1/2 배액과 1 배액에서 적정 함량을 나타냈다. 한편, K 함량은 잎보다 과실에서 높았으며 Ca와 Mg 함량은 잎보다 과실 내에 상당히 적은 양으로 존재하였다. Jones 등 (1991)도 과실이 비대함에 따라 잎으로부터 과실로의 Ca 이동이 매우 제한된다고 보고하였고, Sonneveld (1981) 및 Sonneveld와 Welles (1984)도 과채류의 경우 K는 비교적 쉽게, 반대로 Ca는 어렵게 흡수된다고 하였는데, 본 실험에서도 과실 내로의 Ca 이동이 낮아 다량원소 중 가장 낮은 함량을 나타냈다. 특히 생육과 수량이 높게 나타났던 1 배액에서 과실내 Ca 함량이 낮게 나타난 원인은 과실내 K 함량의 증가가 주원인으로 보이지만 이것은 계속적으로 연구해야 할 과제라고 생각한다.

Table 3-41. Nutrient contents of leaves and fruits of cucumber grown under different nutrient concentrations.

Nutrient concentration	Nutrient content (g/100g dry matter)				
	N	P	K	Ca	Mg
- Leaf -					
1/2 S	2.035 c ^z	0.426 c	4.382 a	3.138 a	0.929 a
1 S	3.364 a	0.633 b	4.631 a	2.946 a	0.737 b
3/2 S	2.805 b	0.759 a	3.345 b	2.501 b	0.598 c
- Fruit -					
1/2 S	1.181 c	0.668 b	3.706 b	0.323 a	0.402 a
1 S	2.826 a	1.052 a	5.318 a	0.215 b	0.412 a
3/2 S	1.399 b	0.966 a	5.037 a	0.332 a	0.322 b

^z The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

이상을 종합해 보았을 때, 작물의 영양 특성에 일치하는 배양액 처방이라는 것은 재배기간 중에 배양액내 이온 조성과 농도의 변화가 적은 것을 의미할 뿐만 아니라 고품질의 생산물을 많이 얻으면서도 비료의 낭비가 적어 실질적인 생산성이 높아지는 특성을 지닌 것을 의미한다 (池田, 1986). 본 실험에서는 일본 야채 시험장 1 배액에서 배양액의 EC와 pH의 변화가 적고 생육과 수량도 많았으므로, 이것을 오이의 영양 특성에 맞는 배양액이라고 말할 수 있다. 따라서, 생육 단계별 양수분흡수율에 의해 개발된 오이 순환식 고품배지 재배용 배양액의 조성은 영양 생장기 동안에는 N 11.4, K 6.0, P 3.3, Ca 4.5 및 Mg 3.5 me·ℓ⁻¹이었고, 생식 생장기 동안에는 N 10.4, P 3.3, K 5.0, Ca 4.5 및 Mg 3.5 me·ℓ⁻¹이 적합한 것으로 나타나 이 조성을 오이 순환식 고품배지 재배용 SCU 배양액으로 하였다.

-개발 배양액의 적합성 검토

본 실험에서 오이 순환식 고품배지 재배용 배양액으로 개발된 SCU배양액의 적합성을 검토하기 위하여 山崎 (1984)가 개발한 오이 순수 수경재배용 순환식 배양액과 화란 온실작물연구소 (PTG)에서 개발한 오이 암면재배용 순환식 배양액과의 비교 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 세 가지 배양액의 무기성분 조성은 Table 3-42와 같다.

Table 3-42. Concentrations of macronutrients in the nutrient solutions used in closed culture system of cucumber plants.

Nutrient solution	Growth stage	Nutrient concentration (me·l ⁻¹)				
		N	P	K	Ca	Mg
Yamasaki ^z		13.0	3.0	6.0	7.0	4.0
PTG ^y		13.0	3.0	6.5	5.5	2.0
SCU ^x	Vegetative stage	11.4	3.3	6.0	4.5	3.5
	Reproductive stage	10.4	3.3	5.0	4.5	3.5

^z Nutrient solution of Yamasaki (Yamasaki, 1984).

^y Nutrient solution of Proefstation voor tuinbouw onder glas te Naaldwijk (PTG) (Sonneveld and Straver, 1992).

^x Nutrient solution of Seoul City University (SCU) for cucumber substrate culture in closed culture system.

山崎 배양액, PTG 배양액 및 새로 개발된 SCU 배양액을 사용하여 오이를 재배했을 때 근권내 EC와 pH 변화를 조사한 결과 (Fig 3-31), 세 가지 종류의 배양액 모두 생육기간 동안 EC는 안정적이었으며 pH도 EC와 마찬가지로 유사한 결과를 보였다. 山崎 배양액은 PTG 배양액이나 SCU 배양액에 비하여 근권내 EC가 약간 높게 나타났는데, 이것은 山崎 배양액 중의 2가 이온이 다른 두 배양액보다 높았기 때문으로 판단한다.

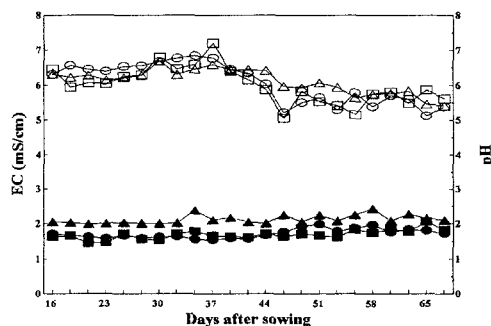


Fig. 3-31. Changes of EC and pH in root zone based on the different nutrient solutions [EC; Yamasaki 1 S (▲), PTG 1 S (■), SCU 1 S (●), pH; Yamasaki 1 S (△), PTG 1 S (□), SCU 1 S (○)].

山崎 (1984) 배양액의 1 배액, PTG (1992) 배양액의 1 배액, SCU 배양액의 1/2 배액, 1 배액 및 3/2 배액을 가지고 순환식 고품배지 시스템으로 오이를 재배하면서 재배기간 동안 다섯 차례에 걸쳐 배양액을 채취하여 배양액 내의 다량원소 농도를 측정하였다 (Fig. 3-32~36).

다섯 가지 처리구에서 배양액내 N, P 및 K 함량은 생육이 진전됨에 따라 감소하는 경향을 보였는데 (Fig. 3-32~36), 특히 P와 K 함량은 착과기에 해당되는 10월 23일 이후로 감소하는 경향이 뚜렷하였다. N, P 및 K와는 달리 배양액내 Ca 함량은 완만하게 상승하는 경향을 보였으나, Mg 함량은 뚜렷한 경향을 보이지 않았다.

山崎 처방은 무기 성분의 균형을 유지하기 쉬운 처방이라고 말할 수 있지만, 장기 재배가 요구되는 과채류에서는 점차적으로 특정 성분의 상승과 하강이 일어난다. 토마토의 경우 $\text{NO}_3\text{-N}$, K, P는 농도가 저하되고 Ca와 Mg 농도는 상승한다고 하였다 (佐佐木, 1986; 嶋田, 1989; 板東, 1991). Morimoto와 Nishina (1992)도 배양액 내의 Ca는 토마토에 의한 흡수가 적기 때문에 재배기간 동안 배양액 내에서 높은 농도를 나타내며, 반면에 K는 흡수가 높기 때문에 배양액 내에서 낮은 농도로 유지되거나 결핍 상태를 나타낸다고 하였다. 이 경향은 토마토 과실의 발육 단계에 현저하게 나타나므로 Ca와 K는 토마토 수경재배시 배양액 조절을 모니터링하는데 중요한 이온들이라고 지적하였다. 김 등 (1996)도 토마토의 DFT (Deep flow technique)와 NFT (Nutrient film technique) 재배에서 배양액 성분 중 Ca와 Mg는 증가하는 추세를 보이고 K는 감소하는 경향을 보였으며 특히 P는 뚜렷하게 감소되어 재배 후기에는 초기 조절치보다 상당량이 감소되었다고 보고하였다.

이처럼 과채류 양액재배에서는 일반적으로 N, P 및 K 함량의 저하와 Ca와 Mg 함량의 상승이 나타난다. 그러나 본 연구에서 3가지 배양액에서 배양액내 N, P 및 K 함량의 저하와 Ca 함량 상승이 나타났지만 문제가 될 정도는 아니었다.

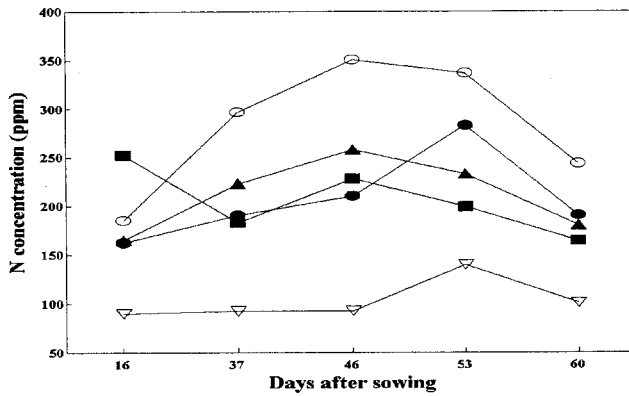


Fig. 3-32. Changes of N concentration in root zone based on different nutrient solutions and nutrient concentrations [Yamasaki 1 S (▲), PTG 1 S (■), SCU 1/2 S (▽), SCU 1 S (●), and SCU 3/2 S (○)].

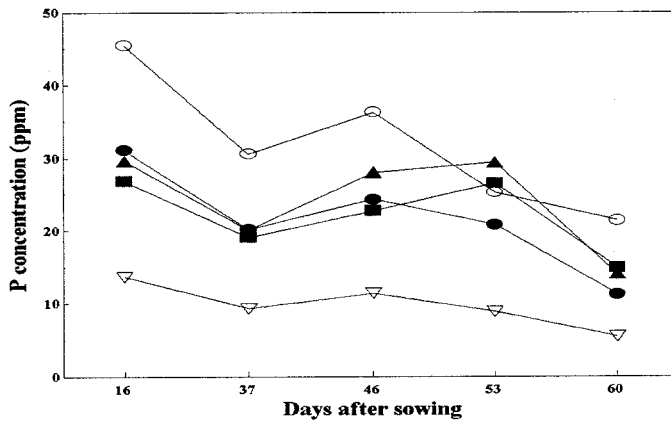


Fig. 3-33. Changes of P concentration in root zone based on different nutrient solutions and nutrient concentrations [Yamasaki 1 S (▲), PTG 1 S (■), SCU 1/2 S (▽), SCU 1 S (●), and SCU 3/2 S (○)].

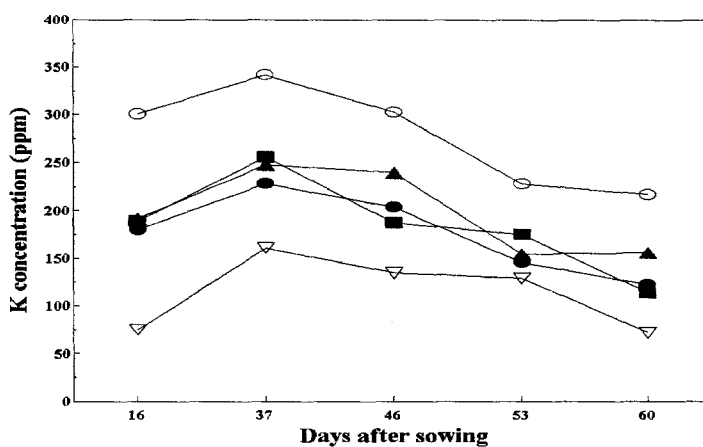


Fig. 3-34. Changes of K concentration in root zone based on different nutrient solutions and nutrient concentrations [Yamasaki 1 S (▲), PTG 1 S (■), SCU 1/2 S (▽), SCU 1 S (●), and SCU 3/2 S (○)].

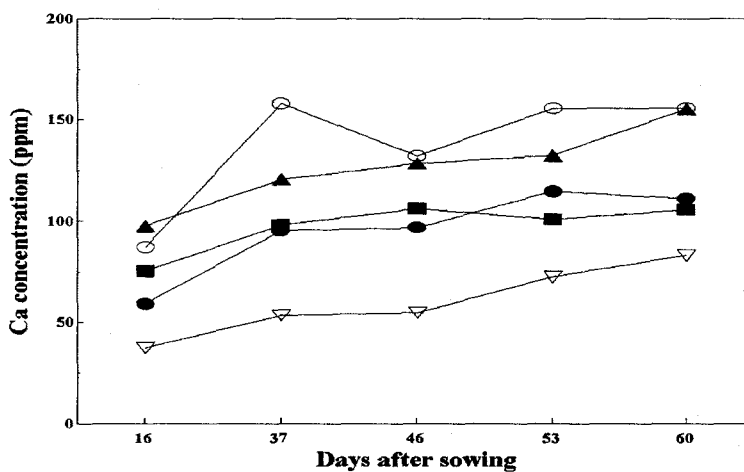


Fig. 3-35. Changes of Ca concentration in root zone based on different nutrient solutions and nutrient concentrations [Yamasaki 1 S (▲), PTG 1 S (■), SCU 1/2 S (▽), SCU 1 S (●), and SCU 3/2 S (○)].

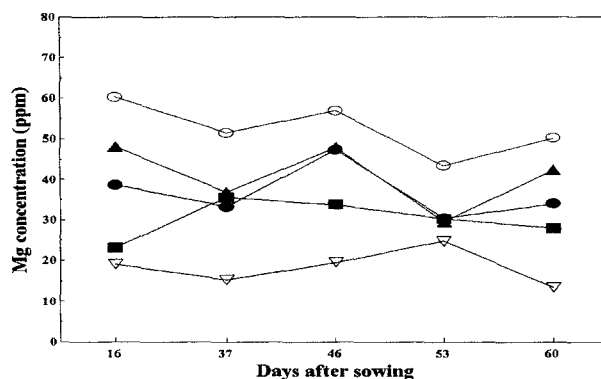


Fig. 3-36. Changes of Mg concentration in root zone based on different nutrient solutions and nutrient concentrations [Yamasaki 1 S (▲), PTG 1 S (■), SCU 1/2 S (▽), SCU 1 S (●), and SCU 3/2 S (○)].

Table 3-43. Effects of different nutrient solutions and nutrient concentrations on net CO₂ assimilation rate, stomatal resistance, and transpiration rate of cucumber leaves 50 days after sowing.

Nutrient solution	Nutrient concentration	Net CO ₂ assimilation rate ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Stomatal resistance ($\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Transpiration rate ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Yamasaki	1 S	20.63 ab ^z	0.321 a	23.85 a
PTG	1 S	18.83 b	0.324 a	20.63 b
SCU	1/2 S	14.68 c	0.273 c	20.42 b
	1 S	21.60 a	0.297 b	22.75 a
	3/2 S	22.07 a	0.315 a	22.87 a

Measuring condition: light intensity; 610~670 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO₂ concentration; 610~670 ppm, leaf temperature; 27~29 °C, RH; 50~60 %.

^z The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

서로 다른 배양액 조건에서 재배된 오이의 광합성속도와 증산속도를 측정한 결과 (Table 3-43), 광합성속도는 SCU 1 배액, 3/2 배액 및 山崎 1 배액에서 높았으며 SCU 1/2 배액과 PTG 1 배액에서 낮았다. 특히 SCU 1/2 배액에서 광합성속도가 낮았던 이유는 배양액 내의 낮은 무기성분 농도로 인하여 오이가 광합성에 필요한 무기 성분들을 충분히 흡수하지 못했기 때문이라 생각한다. 이 결과는 加藤 (1985) 및 加藤와 安岡 (1967) 등의 연구 결과와도 일치하였다. 즉, 오이의 광합성에 대한 N, P 및 K의 영향을 보면, N, P 및 K 중에 어느 한가지가 결핍되어도 광합성 능력이 저하되는데 이 중에서도 특히 N의 영향이 크다고 한다. 생육 초기에 광합성속도가 저하되는 것은 엽내의 N이 작물의 생육과 결실을 위하여 이동되어 엽내 N 함량이 낮아졌기 때문으로 본다.

정식 40일후 배양액 종류와 농도 차이에 따른 초장은 SCU 1 배액에서 가장 높았으며 山崎 1 배액과 SCU 1/2 배액에서 낮게 나타났다 (Table 3-44). SCU 1/2 배액에서 성장 요소들이 가장 낮게 나타났으나 그 외의 4가지 처리구에서 경경, 엽장, 엽폭 및 株당 엽수는 처리간에 차이를 거의 보이지 않았다.

Table 3-44. Effects of different nutrient solutions and nutrient concentrations on the growth of cucumber plants 40days after transplanting.

Nutrient solution	Nutrient concentration	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	No. of leaves
Yamasaki	1 S	142 d ^z	9.15 a	22.1 a	29.6 ab	21.8 a
PTG	1 S	154 b	9.17 a	21.0 ab	31.0 ab	21.3 a
SCU	1/2 S	152 c	8.75 b	19.5 b	28.5 b	22.0 a
	1 S	165 a	9.18 a	22.8 a	30.3 ab	22.5 a
	3/2 S	155 b	9.23 a	23.0 a	31.6 a	21.8 a

^z The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

정식후 55일에 조사한 성장 요소들 중 경경, 엽장, 엽폭 및 株당 엽수는 정식후 40일의 생육 조사 때와 마찬가지로 처리간에 차이를 보이지 않았으며 초장도

SCU 1 배액에서 가장 높았다. 또한, 생체중은 SCU 3/2 배액에서 가장 높았지만 건물중은 SCU 1 배액에서 가장 높았다 (Table 3-45).

각 처리별로 오이의 잎과 과실내 무기성분 함량을 분석하여 中村과 渡部 (1989)가 제시한 오이 영양진단 기준에 따라 엽내 적정 무기성분 함량을 비교하였다 (Table 3-46). 엽내 N, P, K 및 Ca 함량은 SCU 1/2 배액에서 가장 낮았으며 특히 N, P 및 Ca 함량은 적정 범위에 미치지 못하는 수준으로 결핍을 나타내는 함량이었다. SCU 1/2 배액 이외의 네 가지 처리에서 N, P 및 K 함량은 적정 수준을 나타냈다. Ca 함량은 PTG 1 배액과 SCU 1/2 배액에서 적정 수준보다 낮게 나타났다. Mg 함량은 山崎 1 배액, SCU 1 배액에서 최적 수준을 나타냈으나 다른 처리에서의 함량도 결핍 수준은 아닌 것으로 나타났다.

Table 3-45. Effects of different nutrient solutions and nutrient concentrations on the growth of cucumber plants 55days after transplanting.

Nutrient solution	Nutrient conc.	Plant height (cm)	Stem dia. (mm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	No. of leaves	Weight (g/plant)	
							Fresh	Dry
Yamasaki	1 S	273 b ^z	9.67	21.5	31.5 a	28.3 a	534.8 c	51.05 b
PTG	1 S	276 b	9.95	21.5	29.5 ab	27.8 a	552.8 c	45.21 c
SCU	1/2 S	249 c	10.00	21.8	27.5 b	28.5 a	416.6 d	52.31 b
	1 S	302 a	9.95	21.5	28.4 ab	25.3 b	591.2 b	62.06 a
	3/2 S	288 ab	9.48	21.9	29.8 ab	27.5 a	661.0 a	47.72 c

^z The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

본 실험 결과에서 대체적으로 엽내 무기성분 함량이 낮았던 것은 본 적응성 실험이 9월부터 11월의 늦가을에 걸쳐 수행되어 광강도나 온도 등의 기상 조건이 일반 오이 재배에서보다 낮았기 때문에 저농도인 1/2 배액에서 엽내 N, P 및 K 결핍이 나타난 것으로 판단한다. 반면에 Ca와 Mg 함량은 광환경에 의한 영향이 적은 관계로 (山田, 1993), Ca 결핍 수준으로 나타난 것은 배양액과 근권내 Ca 함량이 낮아 흡수가 적었던 것으로 보인다.

Adams와 Massey (1984)도 N과 K의 흡수는 일반적으로 수분흡수와 높은 유의성이 있으며, 또 두 이온의 흡수와 수분 흡수는 광강도와 높은 유의성이 있다고 보고하였다. 또한, 山崎 (1981, 1984)는 양수분흡수율 (n/w) 계산에 의하여 만든 오이 배양액의 경우, 일반적으로 秋冬作은 春夏作의 1.4~1.6배로, 또 결과 수확기에는 0.7~0.8배로 관리한다고 하였다. 작물마다의 배양액 조성은 생육 단계에 따라 거의 변하지 않지만 농도는 생육 단계에 따라 다소 변화시키는 것이 적합하다고 하였다. 본 실험에 있어서 배양액 개발 실험은 여름철에, 그리고 적응성 실험은 가을에 행해졌기 때문에 적응성 실험시 농도를 다소 높일 필요가 있었다고 생각하며 식물체내 무기성분 함량이 낮았던 이유도 이에 기인한다고 생각한다.

Table 3-46. Nutrient contents of leaves and fruits of cucumber grown in different nutrient solutions and nutrient concentrations.

Nutrient solution	Nutrient conc.	Nutrient content (g/100g dry matter)				
		N	P	K	Ca	Mg
- Leaf -						
Yamasaki	1 S	2.606 d	0.273 b	2.143 d	2.536 b	0.677 b
PTG	1 S	3.166 a	0.252 c	3.343 b	1.579 d	0.555 cd
SCU	1/2 S	1.164 e	0.149 d	1.817 e	1.490 d	0.541 d
	1 S	2.986 b	0.365 a	2.936 c	2.001 c	0.731 a
	3/2 S	2.856 c	0.283 b	3.779 a	2.812 a	0.586 c
- Fruit -						
Yamasaki	1 S	0.838 e	0.364 d	2.525 d	0.152 ab	0.200 b
PTG	1 S	1.874 a	0.568 b	4.190 a	0.137 b	0.273 a
SCU	1/2 S	1.321 d	0.414 c	2.614 d	0.172 a	0.260 a
	1 S	1.491 c	0.659 a	3.590 c	0.139 b	0.263 a
	3/2 S	1.732 b	0.354 d	3.746 b	0.161 ab	0.270 a

^z The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

배양액 종류별 오이의 과장, 과경 및 평균과중은 다섯 가지 처리간에 유의차가 없었지만 총수량은 SCU 1 배액에서 가장 높았으며 다음으로 山崎 배양액에서 높게 나타났다 (Table 3-47). 반면에 유럽 오이 재배에 적합한 PTG 배양액에서 가장 낮은 수량을 보였다. 본 실험에서 동양계 오이에 적합한 배양액은 동양계 오이를 공시 품종으로 이용한 SCU액과 山崎액이라는 것을 확인시켜 주었다.

오이 순환식 고품배지경에 적합한 배양액 개발 실험과 개발 배양액의 적합성 검증 실험의 결과를 종합해 보면, 본 실험에서 개발된 SCU 배양액은 근권내 EC, pH 및 무기성분 농도의 변화가 적었다. 또한 기존에 개발되어 있는 오이 순환식 배양액과 비교할 때 생육과 수량면에서 우수하였다. 그러므로, SCU 배양액은 국내의 오이 순환식 고품배지경에 적합한 배양액이라 할 수 있다.

Table 3-47. Effects of different nutrient solutions and nutrient concentrations on early yield of cucumbers.

Nutrient solution	Nutrient concentration	Fruit length (cm)	Fruit diameter (cm)	Average fruit weight (g)	Total yield (g/plant)
Yamasaki	1 S	21.2	3.0	126.6	1645 ab ^z
PTG	1 S	21.0	2.9	116.9	1404 d
SCU	1/2 S	21.2	3.0	125.7	1508 cd
	1 S	21.1	2.9	115.0	1724 a
	3/2 S	20.8	2.9	113.2	1584 bc

^z The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

3. 적요

가. 식물공장 엽채류 최적 근권환경

식물공장 재배 엽채류 및 허브식물(잎상추, 반결구 상추, 엔다이브, 치커리, 딜, 바실)의 최적 배양액 개발을 한 결과 아래 표와 같이 정리 될 수 있다.

작 물	T-N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	미량원소
	-----me/ℓ-----					ppm
적 측면(잎상추)	11.7	2.0	6.7	3.5	2.0	Fe-2.00
청 측 면	11.1	1.8	6.7	3.1	2.0	Cu-0.05
반 결 구	7.5	2.0	6.5	3.0	2.0	B-0.45
엔다이브	9.9	2.1	5.5	3.7	2.0	Mn-0.30
치 커 리	13.0	3.0	7.2	4.0	3.0	Zn-0.30
딜	9.4	2.1	6.2	2.8	1.7	Mo-0.05
바실	12.8	3.6	5.8	5.8	3.0	

나. 병용형 식물공장의 과채류 최적 근권환경

태양광 병용형 식물공장에서 재배 가능한 과채류의 최적 배양액 조건을 생육단계에 따라 수행한 결과 아래 표와 같이 정리 될 수 있다.

작 물	T-N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	미량원소	
	-----me/ℓ-----					ppm	
오	영양생장기	11.4	3.3	6.0	4.5	3.5	
이	생식생장기	10.4	3.3	5.0	4.5	3.5	Fe-1.500
토	펠라이트 육묘기	13.5	3.3	7.0	7.0	3.5	Cu-0.045
	영양생장기	14.2	3.3	8.0	7.5	4.0	B-0.350
마	결실비대기	10.0	3.0	7.0	6.0	3.0	Mn-0.580
	코코피트 육묘기	6.5	1.5	3.5	3.5	2.0	Zn-0.350
토	영양생장기	7.0	1.5	4.0	3.5	2.0	Mo-0.050
	결실비대기	6.0	1.0	3.5	3.0	1.5	

제 2절 식물공장 재배식물의 최적 근권 환경 연구

1. 재료 및 방법

가. 근권내 배양액의 최적 pH 수준

이 실험은 서울시립대학교 환경원예학과 온실에서 수행하였다. 잎상추(*Lactuca sativa* L. 'Brigida') 품종을 1997년 3월 29일에 폴리우레탄 스폰지에 파종하여 5월 10일에 정식하였다. 재배 시스템은 박막수경법(NFT)이고 재배는 스티로폼 성형제품[40(W)×120(L)×15(H)cm] 베드에서 수행하였다. 베드는 배액구쪽에 20ℓ 급배액용기를 설치한 후 15W용량의 수증전기펌프를 사용하여 배양액을 순환시켰다. 배양액은 서울시립대학교 잎상추 배양액(N 11.7, P 2.0, K 6.7, Ca 3.5, Mg 2.0 meL⁻¹)(남, 1998)을 사용하였다. 배양액내 EC는 EC자동조절기(CETW-300T, Kawamoto)로 1.5 ± 0.2 mScm⁻¹를 유지하였고, pH는 pH자동조절기(PET-300A, Kawamoto)를 사용하여 pH 3.0, 4.0, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 8.0으로 각각 조절하였다. pH조절은 KOH와 H₂SO₄로 하였다. 생육조사와 광합성(Li-6200, Li-COR), 증산량(Li-1600, Li-COR) 측정은 정식 26일 후에 하였다. 생육조사는 엽수, 최대엽장, 최대엽폭, 지상부와 지하부생체중, 건물중 등을 조사하였다. 식물체는 생육조사 후 지상부와 지하부를 각각 건조기에 넣어 65℃에서 완전히 건조시킨 다음, 건물중을 측정하였고 지상부는 마쇄하여 분석시료로 사용하였다. 식물체내 질소함량을 측정하기 위하여 분쇄된 시료를 0.5 g씩 칭량하여 Kjeldahl flask에 넣고 분해촉진제(CuSO₄:K₂SO₄=1:9) 5 g과 진한 황산 10 ml를 가하여 분해조에서 360℃로 2시간 동안 분해하였다. 분해액은 질소자동증류기(Büchi 323)로 증류하여 0.005 N-H₂SO₄로 적정하여 전질소함량을 측정하였다. 질소이외의 무기이온 함량을 측정하기 위하여 시료 0.5 g을 칭량하여 100 ml삼각플라스크에 넣고 ternary solution (HNO₃ : H₂SO₄ : HClO₄ =10 : 1 : 4)을 10 ml넣고 360℃ 전열판에서 6-7시간 분해한 후, 인산은 Vanadate법으로 470 nm에서 비색계(UV 2100, Shimadzu)를 사

용하여 분석하였고, 칼륨, 칼슘과 마그네슘은 원자흡광광도계(Perkin Elmer 3100)를 사용하여 정량한 후 건물중에 대한 백분율(%)로 환산하였다.

나. 근권내 최적 배양액 농도(EC)

이 실험은 서울시립대학교 환경원예학과 비닐온실에서 수행하였다. 잎상추(*Lactuca sativa* L. 'Brigida') 품종을 1997년 3월 29일에 폴리우레탄 스펀지에 파종하여 5월 10일에 정식하였다. 재배 시스템은 박막수경(NFT)방식이었고 배양액은 서울시립대학교 잎상추 배양액(남, 1998)을 사용하였다. 배양액의 pH는 pH자동조절기를 사용하여 pH 5.8 ± 0.2 로 조절하였고 EC는 EC자동조절기를 사용하여 0.8, 1.2, 1.8, 2.4, 3.6 mScm^{-1} 로 조절하였다.

배양액의 pH는 KOH와 H_2SO_4 를 이용하여 조절하였다. 생육조사와 광합성, 증산량을 측정하였고 식물체분석과 배양액분석은 앞의 pH실험과 동일하였다.

다. 근권내 용존산소 함량의 영향

잎상추(*Lactuca sativa* L. 'Grand Rapids') 품종을 1997년 1월 21일에 폴리우레탄 스펀지에 파종하고 3월 11일에 정식하여 4월 28일까지 수행하였다. 재배시스템은 담액수경(Deep Flow Technique)으로 하였고 재배조는 플라스틱상자(45 cm \times 35 cm \times 12 cm)로 두께 1.5 cm의 styrofoam판으로 뚜껑을 한 후 15 cm \times 15 cm 간격으로 구멍을 뚫고 구멍당 1주씩, 상자당 8주를 정식하였다. 재배상자에 10 cm 깊이까지 양액을 넣고 15 l 상자당 3W 에어펌프에 연결한 다공석(Air stone)을 각각 0, 1, 3개씩 넣은 3처리구와 액면저하식의 순환식 담액처리로 총 4가지 수준으로 하였다. 통기처리에 따른 용존산소량은 용존산소계(DO600, DONGIL)로 각각 2-3 mg L^{-1} , 5-6 mgL^{-1} , 6-7 mgL^{-1} , 7-8 mgL^{-1} 으로 조절하였다. 배양액은 서울시립대학교 잎상추 배양액(남, 1998)을 사용하였다. 배양액농도는 1.5~1.6 mScm^{-1} , pH는 5.8 ± 0.2 로 유지하였다. 생육조사와 광합성 및 증산량 측정방법은 앞의 pH실험과 동일하였다.

라. 근권내 온도의 영향

앞상추(*Lactuca sativa* L. 'Tuksum') 품종을 1997년 10월 11일에 폴리우레탄 스폰지에 파종하여 10월 30일에 정식하였다. 재배 시스템은 NFT방식이고 베드는 배양액구쪽에 20ℓ 급배액용기를 설치한 후 15W용량의 수중전기펌프를 사용하여 배양액을 순환시켰다. 배양액탱크에 전열선을 설치하고 자동온도조절기를 부착하여 온도를 15℃, 20℃, 25℃, 30℃로 조절하였다. 배양액은 서울시립대학교 앞상추 배양액(남, 1998)을 사용하였다. EC는 $1.5 \pm 0.2 \text{ mScm}^{-1}$ 로 유지하였고 pH는 5.8 ± 0.2 로 각각 유지하였다. 생육초기와 후기에 엽수, 최대엽장, 최대엽폭, 근장, 지상부·지하부 생체중을 각각 조사하였다.

마. 배양액내 무기이온 조절

반결구상추(*Lactuca sativa* L. 'Omega') 품종을 1998년 1월 20일에 폴리우레탄 스폰지에 파종하여 3월 11일에 정식하였다. 배양액은 서울시립대학교 반결구상추 배양액(N 11.7, P 2.0, K 6.7, Ca 3.5, Mg 2.0 meL^{-1})(남, 1998)을 사용하였다. 재배 시스템은 NFT 시스템으로 40(W)×120(L)×15(H) cm 베드에서 20 cm×20 cm 간격으로 10주의 식물을 2줄로 심었다. 배양액은 EC조절(EC), N, P, K조절(NPK), N, P, K, Ca, Mg조절(Macro), 다량원소와 미량원소 조절(Macro & Micro)의 4가지 처리로 각각 조절하였다. 배양액의 pH는 5.8 ± 0.2 로 유지하였다. 2-3일 간격으로 EC조절구는 EC를 측정해서 1.5 mScm^{-1} 로 유지하고, 나머지 처리구는 배양액을 정밀분석하여 모자라는 각각의 조절이온함량을 비료로 보충해 주어 조절하였다. 생육조사, 광합성측정, 증산량 측정 및 배양액 분석은 앞의 pH실험과 동일하였다.

바. 식물공장의 급액제어

식물공장에서는 일반 수경재배 농가와와는 달리 급액제어를 좀더 정밀한 제어가

요구된다. 따라서 급액제어 연구는 식물의 증산량과 가장 밀접한 연관성을 나타내는 일사량(광도)에 따라 급액을 자동으로 이루어 질 수 있는가를 알아보기 위해서 적산일사량에 의한 급액 가능성을 알아 보았다.

재배작물은 반결구 상추로서 '강산 사라다'품종을 1998년 3월 14일에 파종하였다. 육묘는 발아가 시작되면서 양액으로 교체하여 배양액의 전기전도도(EC)를 $0.8\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, pH는 5.8수준으로 공급하였고, 발아된 뒤 10일 이후 부터는 EC는 $1.0\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, pH는 5.8수준으로 공급하였고, 발아된 뒤 10일 이후부터 EC는 $1.0\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, pH는 5.8수준으로 공급하였다. 정식은 1998년 4월 5일 NFT베드에 하였고, 사용된 배양액은 서울시립대학교 반결구 상추 배양액을 사용하였다.

급액방식은 적산일사량과 타이머에 의한 처리구로 나누어 제어하였는데, 적산일사량구는 일사량이 5, 10, 15, 20, $30\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ 로 각각 적산되었을 때 급액되는 처리구이다. 야간에는 두처리 모두 타이머에 의해 급액을 하였다. 급액시간은 적산일사량구의 경우 5, 10, 15, 20, $30\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ 모두 5분으로 설정하였고 타이머에 의한 급액도 서브타이머를 이용해서 5분동안 작동되고 5분동안은 정지되도록 설정하였다. 실험에 사용된 일사량계는(W6510, CASELLA)하우스 외부에 태양광선이 충분히 도달하는 위치에 수평으로 설치하였다.

근권내 pH, EC는 간이측정기(VOLMATIC)로 2일에 한번씩 EC는 $1.5\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 로 관리하였고, pH는 KOH와 H_2SO_4 를 이용하여 pH 6.0으로 보정하였다.

2. 결과 및 고찰

가. 근권내 배양액의 최적 pH 수준

배양액의 pH가 3.0에서 6.5로 증가함에 따라 광합성은 증가하고 기공저항은 감소했다. 그러나 증산량은 pH 3.0에서 pH 5.0까지는 증가하였으나 pH 5.0부터 pH 8.0까지는 5%수준에서 유의성이 없었다. 광합성속도와 증산량은 pH 5.0이상의 처리구에서 거의 차이가 없었으며 기공저항은 pH 5.5 이상에서 낮게 나타나 山崎(1981)가 보고한 pH 5.5~6.5 범위보다는 조금 넓은 pH 5.0~7.0정도의 범위에서도

생리적인 활성이 원만하게 유지되는 것으로 보였다(Table 3-48).

Table 3-48. Effect of pH levels on CO₂ assimilation rate, transpiration rate and stomatal resistance of leaf lettuce in Nutrient Film Technique.

pH	CO ₂ assimilation ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Transpiration ($\mu\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Stomatal resistance (scm^{-1})
3.0	4.07 c ^z	11.83 c	1.088 a
4.0	5.65 b	38.15 b	0.628 b
5.0	6.25 ab	46.13 a	0.48 c
5.5	6.30 ab	44.86 a	0.289 d
6.0	6.43 ab	45.15 a	0.363 cd
6.5	7.05 a	43.51 a	0.278 d
7.0	6.36 ab	43.06 a	0.270 d
8.0	5.18 b	43.46 a	0.285 d

^zDuncan's multiple range test, significant at 5% level.

엽내 무기성분함량은 N와 K는 pH 5.0 이상에서는 함량의 차이가 없었으나 pH 5.0 이하에서는 급속히 감소하였다. 엽내 Ca와 P함량은 pH 6.0 이상에서 낮아지는 경향을 보였고 Mg은 pH 3.0을 제외하고는 함량차이가 별로 없었다(Fig. 3-37). 이는 pH가 6.0 이상이 되면 배양액내의 Ca와 P가 침전되어 그 유효도가 급격히 떨어지기 때문이다(Diatloff, 1994). pH 3.0에서는 모든 다량원소의 엽내 함량이 가장 낮게 나타났다. 본 실험에서는 pH 3.0의 뿌리에서 심한 손상과 갈변이 관찰되었는데, 이러한 뿌리의 세포막 붕괴로 인해 이온흡수가 안 되었기 때문으로 보인다. Bres 등(1992)은 배양액 pH를 5.0, 5.5, 6.0, 6.5로 처리했을 때 pH가 상추엽내 질소함량에 영향을 주지 않았지만 K함량은 pH가 높아짐에 따라 증가했고 결과적으로 Ca나 Mg에 대한 K비율이 증가했다고 했다. 비록 배양액 pH가 P, Ca, Mg함량에 영향을 주지만, 무기성분함량 차이는 크지 않았고 그 차이가 상추의 생체중 차이와 관련이 있는 것은 아니라고 해 본 실험과 유사한 경향을 보였다.

pH별 배양액내 N, K의 농도는 정식 2주 후에 가장 낮게 나타났으며 3주 후부터 다시 높아졌다(Fig. 3-38). 정식 2주 후의 수치는 분석오차로 인해 낮게 나타난 것으로 생각되고, 초기부터 후기로 갈수록 점차 낮아지는 경향일 것으로 생각된다. 반면 P농도는 정식 2주 후부터 계속 낮아졌으며 특히 pH 8.0은 초기부터 P의 농도가 매우 낮게 유지되었는데 이는 알칼리 조건에서 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 형성으로 인해 그 함량이 낮게 나타난 것으로 생각된다. Ca, Mg의 함량은 pH처리구별 생육기간내 변화의 폭이 적었으나 점차 증가하는 경향을 보였다. 근권 K, Ca, Mg농도는 pH 3.0에서 가장 낮게 나타났으나 N, P는 가장 높게 유지되었다. 이는 낮은 pH에서 수소이온이 양이온의 흡수에 길항작용을 해서 낮아지기 때문인 것으로 보인다.

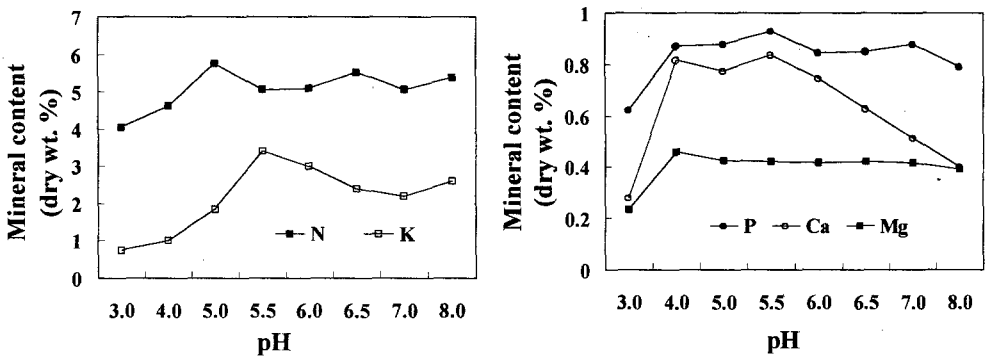


Fig. 3-37. Mineral contents in leaf lettuce as influenced by pH control of nutrient solutions.

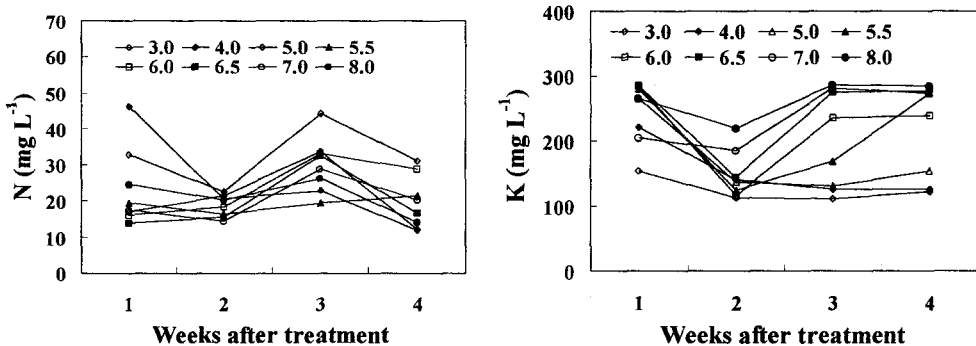


Fig. 3-38. Changes in $\text{NO}_3\text{-N}$ and K concentration in the nutrient solution during 4 weeks after pH control of nutrient solutions.

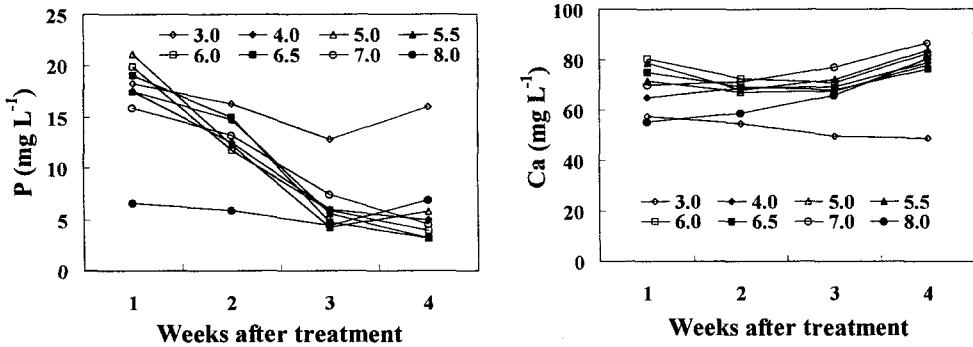


Fig. 3-39. Changes in P and Ca concentrations in the nutrient solution during 4weeks after pH control of nutrient solutions.

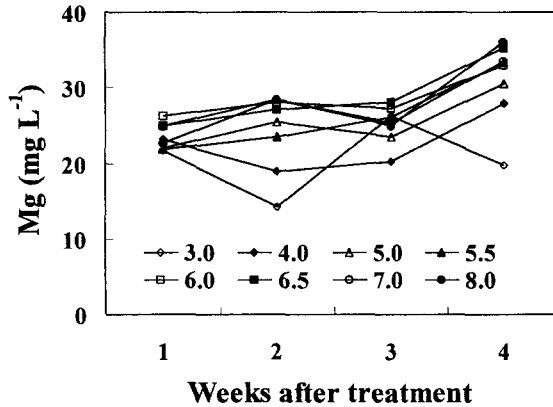


Fig. 3-40. Change in Mg concentration in the nutrient solution during 4weeks after pH control of nutrient solutions.

pH가 pH 3.0에서 pH 6.5로 증가함에 따라 엽수, 엽장, 엽폭을 비롯한 생체중, 건물중이 증가하였으나 pH 7.0과 pH 8.0에서는 감소하여 생육 적정 pH의 범위가 나타났다(Table 2). pH 7.0과 pH 5.5를 비교하면 엽장, 엽폭을 같으나 엽수는 pH 7.0이 많음에도 불구하고 생체중과 건물중은 pH 5.5가 크게 나타나 잎의 두께생장에 차이가 있는 것으로 예상되고 이것에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 잎상추의 생체중과 건물중 모두 pH 5.5~6.5에서 가장 높게 나타나 수경재배의 최적 pH 범위임을 알 수 있었다. pH 3.0에서는 생육이 현저하게 감소했다. 이는 뿌리의

심한 손상으로 인해 이온흡수가 이루어지지 않았기 때문이다. pH 4.0, 7.0, 8.0도 생체중이 감소하여 적정 pH범위로 볼 수 없으나 가시적인 생리장해를 나타내지 않는 것으로 보아 상추가 넓은 pH범위에 적응하는 것으로 생각되었다. 位田(1982)은 뿌리 세포의 효소활성이 H⁺농도에 영향을 받는데, pH가 높고 낮음에 따라 가시적인 장해를 나타내지는 않아도 생육에 영향을 받으며, pH가 낮게 되면 옥신이 나 사이토키닌의 활성이 낮아져 발근이나 뿌리신장이 나빠진다고 보고했다.

位田(1982)은 과종 후 2~3주된 상추 유묘는 pH 7.0에서 생체중이 높았고 산성 부근(pH3.0~4.0)에서도 생육 불량이었다. pH5.0~8.0간에 생육 차이가 작았다고 보고했는데, 과종 30일 후에 pH 처리를 한 본 실험과 pH 3, 4, 7에서 차이를 보여주고 있다. Arnon 등(1942)은 토마토에서 pH5~7범위에서는 생육이 크게 영향을 받지 않았고 이 범위를 벗어났을 때는 생육이 급격하게 감소했다고 해 pH 5.0부터 7.0까지는 채소작물생육에 큰 장해가 되지 않음을 알 수 있다.

Table 3-49. Effect of pH levels on growth of leaf lettuce in Nutrient Film Technique.

pH	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)	
				Top	Root	Top	Root
3.0	11.5 b ²	8.25 c	8.35 d	6.56 c	6.84 c	0.8 c	0.49 c
4.0	20.5 ab	15.2 b	14.9 c	79.6 bc	24.25 b	4.18 ab	1.01 ab
5.0	21.0 ab	15.5 b	15.8 ab	90.0 ab	23.6 b	4.26 ab	0.97 ab
5.5	22.0 ab	16.0 ab	17.3 a	104.9 a	29.0 ab	4.74 a	0.97 ab
6.0	23.5 a	16.8 a	16.3 ab	104.2 a	36.9 a	5.62 a	1.40 a
6.5	24.0 a	17.3 a	17.5 a	112.8 a	33.3 a	5.40 a	1.29 a
7.0	23.5 a	16.0 ab	17.3 a	94.1 ab	30.3 ab	4.60 a	1.18 ab
8.0	21.5 ab	16.3 ab	16.7 a	94.3 ab	27.4 ab	4.26 ab	1.39 a

²Duncan's multiple range test, significant at 5% level.

이상에서 볼 수 있듯이 상추 수경재배에서 근권내 적정 pH는 광합성, 증산량 및 생육량의 결과를 미루어 봤을 때 pH 5.5~6.5로 보였다. 그러나, 엽내 무기성분 함량면에서, pH 6.5에서 Ca함량이 낮아지는 것으로 나타났다. 따라서 pH 6.5 이상에서 생육이 되면 잎끝마름증(tipburn)이 나타나 상추품질을 저하시킬 것으로 예

상되므로, 최적 근권 pH는 5.5~6.0범위인 것으로 판단되었다. 또, pH 3.0을 제외한 pH 4.0, 7.0, 8.0 에서 가시적인 장애를 나타내지 않고 약간의 생육감소만 보이므로 상추가 넓은 범위의 pH에 적응할 수 있는 것으로 생각된다.

나. 근권내 최적 배양액 농도

배양액 농도는 1.2 mScm⁻¹와 1.6 mScm⁻¹ 에서 자란 상추의 CO₂동화율이 다른 EC범위의 것보다 높았다. 증산량과 기공저항은 전처리구간 차이가 없었으나 농도가 높아질 수록 증산량이 점차 낮아지는 것을 보였다(Table 3-50). 이것은 배양액 농도가 높아질 수록 수분흡수가 어려워 증산작용이 낮아지기 때문인 것으로 보이며 EC 1.2~1.6mScm⁻¹에서 뿌리의 양수분 흡수가 원활히 이루어져서 생육이 왕성히 이루어진 것으로 생각된다.

Table 3-50. Effect of EC levels on CO₂ assimilation rate, transpiration rate and stomatal resistance of leaf lettuce in Nutrient Film Technique.

EC (mScm ⁻¹)	CO ₂ assimilation ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Transpiration ($\mu\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Stomatal resistance (scm ⁻¹)
0.8	8.62 b ^z	37.1	0.31
1.2	9.30 ab	38.5	0.33
1.6	10.02 a	37.8	0.24
2.0	9.02 b	38.2	0.22
2.4	9.07 b	36.8	0.28
3.6	9.04 b	36.6	0.29

^zDuncan's multiple range test, significant at 5% level.

일반적으로 무기성분의 흡수는 배양액내 무기성분 농도에 비례한다(Adams, 1992). 식물체내 무기이온 함량에서 N, K는 전기전도도가 높아질수록 엽내 함량이 증가하는 경향을 보였으나 1.6 mScm⁻¹ 부터 3.6 mScm⁻¹ 까지 거의 비슷한 함량을

나타냈다. P는 EC가 0.8~2.4 mScm⁻¹로 증가함에 따라 엽내 함량이 높았으나 3.6 mScm⁻¹에서는 감소경향을 보였다. Ca, Mg 함량은 EC 2.4 mScm⁻¹까지 거의 비슷한 함량을 나타냈으나, Ca은 3.6 mScm⁻¹에서 현저히 그 함량이 낮아졌다(Fig 3-41). 이는 전기전도도(EC)가 증가되면 뿌리의 상대수분함량과 근활력이 감소를 보이고 뿌리의 삼투압저하로 인한 수분흡수가 억제되어 Ca이동의 저하로 인한 Ca 결핍이 일어날 수 있다는 보고(Ehret 등, 1986)와 합치되는 결과로서 상추재배시 근권 EC수준이 상추 품질에 큰 영향을 미칠 수 있는 증거라고 생각된다.

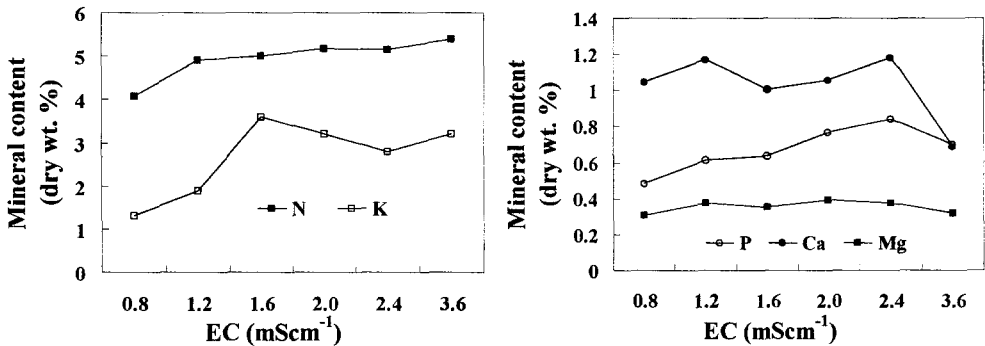


Fig. 3-41. Mineral contents in leaf lettuce as influenced by EC control of nutrient solutions.

배양액내 무기이온 농도는 전기전도도(EC)가 높은 처리구일수록 높게 나타났으며 같은 처리구내 생육기간에 따른 무기이온 함량의 변화폭은 적었다. N, K 농도는 고농도를 제외하고 식물생육이 왕성한 정식 2주 후부터 저하되었다. P함량은 저농도(0.8, 1.2 mScm⁻¹)에서 2주 후부터 감소되어 저농도로 유지될 때 시간이 지남에 따라 P의 결핍가능성이 예상되었다. 배양액내 Ca함량은 생육이 지속될수록 증가되고 있다. 특히 고농도인 3.6 mScm⁻¹에서는 근권내 Ca함량은 높아지고 식물체의 Ca흡수는 낮아져 생육 후기에 Ca 결핍을 유도하는 것으로 보인다. 배양액내 Mg함량은 생육이 지속될수록 약간 높아지는 경향을 보였으나 변화폭은 크지 않았다(Fig. 3-42, 43, 44.)

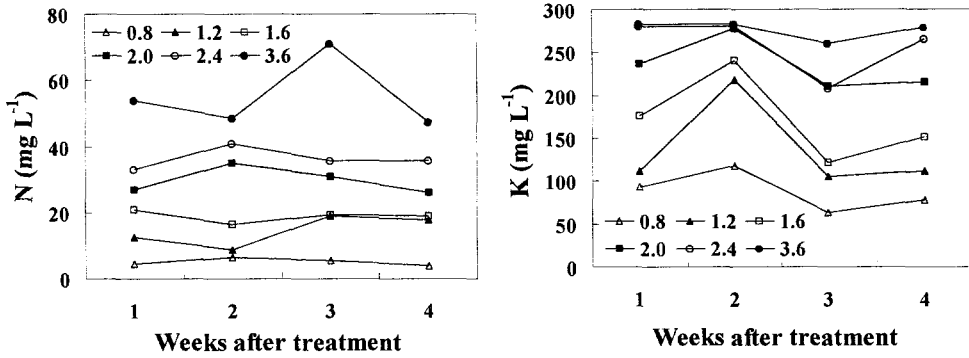


Fig. 3-42. Changes in NO₃-N and K concentrations in the nutrient solution during 4 weeks after EC control of nutrient solutions.

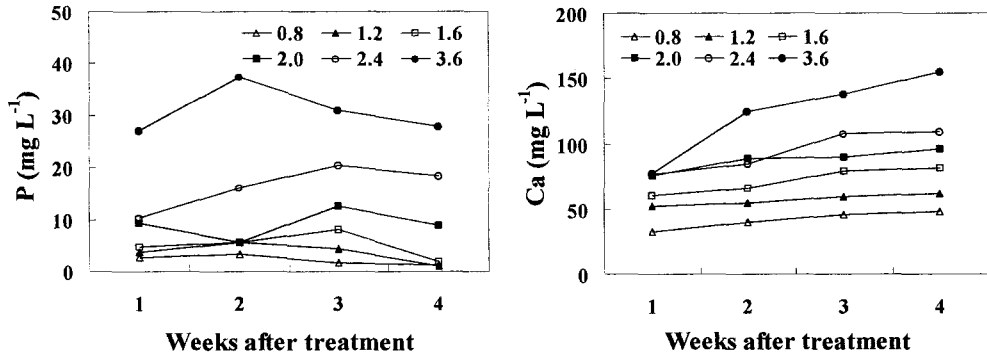


Fig. 3-43. Changes in P and Ca concentrations in the nutrient solution during 4 weeks after EC control of nutrient solutions.

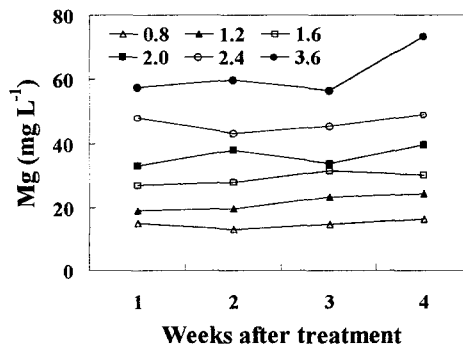


Fig. 3-44. Change in Mg concentration in the nutrient solution during 4 weeks after EC control of nutrient solutions.

생육은 전기전도도 1.2 mScm⁻¹ 부터 2.4 mScm⁻¹까지 거의 비슷한 생육량을 나타냈다. 특히 1.2와 1.6 mScm⁻¹에서 가장 높은 건물중과 생체중을 나타냈고 0.8과 3.6 mScm⁻¹에서 가장 낮은 생육량을 보였다(Table 3-51). EC 20 mScm⁻¹은 24 mScm⁻¹ 보다 생육이 저조한 것을 볼 수 있는데 이는 생육 초기에 양액 공급펌프의 정지로 인해 수분스트레스를 받은 영향으로 생각된다. 또, 3.6 mScm⁻¹에서 엽내 Ca의 함량이 낮아 생육이 낮아졌으며 특히 생육후기는 잎끝마름증(tipburn)현상도 나타나기 시작하였다. 일반적으로 고농도에서는 생장이 억제되는 것을 볼 수 있는데 이것은 고농도에 의한 배지의 삼투포텐셜의 저하로 흡수가 낮아지고, 특정이온의 과잉흡수나 흡수장애가 생기는 데에 기인하는 것으로 보인다.

Sonneveld(1993)에 따르면 토마토에서 Ca와 Mg의 흡수는 고농도 EC에서 가장 낮았다고 한다. 이것은 양이온의 전체흡수량은 배양액의 농도와 상관없이 일정하나, 고농도일수록 Ca이나 Mg 같은 2가 양이온보다 K같은 1가 양이온의 이동성이 빨라 상대적으로 Ca, Mg흡수가 낮아지게 되기 때문으로 보여진다.

Table 3-51. Effect of EC levels on growth of leaf lettuce in Nutrient Film Technique.

EC (mS cm ⁻¹)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)	
				Top	Root	Top	Root
0.8	20.5 a ^z	16.3 a	16.5 ab	94.4 b	15.5 c	4.41 bc	0.65
1.2	20.5 a	16.4 a	17.2 a	126.7 a	32.0 a	6.01 a	0.79
1.6	20.0 a	16.8 a	17.6 a	102.7 a	29.7 a	5.48 ab	1.17
2.0	18.5 b	15.0 b	16.5 ab	91.0 b	29.0 a	4.86 b	0.99
2.4	19.5 ab	16.8 a	17.0 a	101.7 a	22.0 b	4.95 b	0.91
3.6	18.0 b	16.8 a	15.7 b	87.7 b	19.5 b	4.77 b	0.85

^zDuncan's multiple range test, significant at 5% level.

Abou-Hadid 등(1996)은 상추수경재배에 적합한 배양액의 EC가 1.0~1.5 mScm⁻¹이고, Cresswell(1991)는 2.0 mScm⁻¹라고 했다. Varley 등(1981)은 결구상추에 알맞은 EC범위는 매우 좁은 편으로 1.5~1.8 mScm⁻¹이고 1.8 mScm⁻¹이상의

고농도에서는 식물체가 왜소하고 잎이 딱딱해지며, 1.5 mScm⁻¹이하의 저농도에서는 K결핍과 함께 하엽이 황화된다고 하였다. 이처럼 연구자의 결과가 약간씩 차이가 있는 것은 연구 지역의 환경과 밀접한 관계가 있기 때문으로 보인다. 본 실험에서는 잎상추 수경재배에 있어서 품질과 생산성을 고려한 적정 배양액농도는 EC 1.2~1.6 mScm⁻¹가 적합한 것으로 판명되었다.

다. 근권내 용존산소 함량의 영향

배양액의 용존산소는 뿌리의 호흡을 촉진시켜 작물의 양수분 흡수 및 생육에도 커다란 영향을 미치는 요인이다.

이러한 용존 산소를 조절하여 상추를 재배하였을 때, 용존산소 함량이 높을 수록 광합성과 증산량의 증가가 뚜렷하게 나타났고 기공저항은 낮아졌다(Table 3-52). 2~3mgL⁻¹에서는 가장 낮은 광합성과 증산량을 보였는데 뿌리호흡에 이용되는 산소가 부족해 생육이 지연된 결과이다. 또, 배양액 순환에 의한 폭기식도 용존산소함량이 다른 처리에 비해 높게 유지되어 상추의 광합성과 증산량이 가장 높게 나타났다. 이는 양액내 용존산소가 뿌리의 호흡을 활성화하여 양수분의 흡수 뿐 아니라 작물생장이 증가된 결과로 보인다. 그러나 Chun 등(1994)은 용존산소가 낮으면 뿌리호흡의 감소를 가져오고 과포화된 용존산소에서 상추뿌리가 암갈색으로 변색되었고 생육이 지연되었다고 하였다.

Table 3-52. Effect of dissolved O₂ concentration on CO₂ assimilation rate, transpiration rate and stomatal resistance of leaf lettuce in Nutrient Film Technique.

DO conc. (mg L ⁻¹)	Circulation	CO ₂ assimilation (μ molm ⁻² s ⁻¹)	Transpiration (μ gcm ⁻² s ⁻¹)	Stomatal resistance (s cm ⁻¹)
2.0-3.0	NO	3.69 c ^z	3.94 c	5.37 a
5.0-6.0	NO	6.14 b	10.3 b	4.20 b
6.0-7.0	NO	9.02 ab	15.2 ab	2.85 c
7.0-8.0	Yes	10.33 a	17.5 a	2.70 c

^zDuncan's multiple range test, significant at 5% level.

지상부 건물중은 무처리(2~3mgL⁻¹)에 비하여 인위적으로 기포 발생을 시킨 다른 처리구에서 모두 현저하게 증가하였고 특히 후기에 들어서 그 차이가 더욱 커졌다. 이는 생육후기에 상추 뿌리의 증가로 인해 산소 요구도가 높아짐에 따라 용존산소 증대효과가 현저한 것으로 보인다.

宇田(1996)은 일반적으로 배양액중에 산소량이 증가하면 작물의 생육량이 증가한다고 했다. 뿌리건물중도 지상부와 마찬가지로 무처리에 비해 처리구에서 모두 현저한 증가를 보였다. 이는 배양액의 용존산소량이 증가로 인해 뿌리의 발달이 왕성했던 것으로 생각된다.

7~8mgL⁻¹ 에서 건물중을 비롯한 생체중, 엽수, 엽장, 엽폭이 가장 높게 나타났다. 2~3mgL⁻¹ 를 제외한 7~8mgL⁻¹ 이하의 다른 농도에서 시각적인 장애는 나타나진 않았지만 어느 정도의 용존 산소 스트레스를 받아 생육이 저조한 것으로 나타났다. 2~3mgL⁻¹ 에서는 상추 뿌리가 암갈색으로 변색되어(자료생략) 생육이 억제되었고 생체중이 23.17g 으로 가장 낮게 나타났다(Table 3-53).

Table 3-53. Effect of dissolved O₂ concentration on growth of leaf lettuce at the 26th day after planting in Nutrient Film Technique.

DO conc. (mg L ⁻¹)	Circulation	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)	
					Top	Root	Top	Root
2.0-3.0	NO	17.33b ²	12.70c	11.50c	23.17d	7.13d	1.69d	0.64d
5.0-6.0	NO	18.00b	17.33b	14.03b	51.07c	12.67c	2.94c	0.88c
6.0-7.0	NO	20.33ab	20.70a	15.97b	78.10b	17.77b	4.37b	1.16b
7.0-8.0	Yes	22.67a	21.03a	18.67a	121.84a	22.53a	6.18a	1.40a

²Duncan's multiple range test, significant at 5% level.

Jackson(1980)은 양액내 용존산소가 부족하면 유기산, 에틸렌가스 그리고 용존이산화탄소의 축적을 일으켜 뿌리의 신진대사활력이나 뿌리생육이 억제될 수 있다고 했다. 郭과 橋(1997)은 토마토의 한계 용존산소 농도는 액온에 관계없이

2mgL⁻¹ 이고, 오이는 33℃에서는 2mgL⁻¹ 이하에서 생육이 억제되나, 25℃에서는 1mgL⁻¹ 에서도 거의 정상적인 생육을 한다고 했다. 小田(1988)은 상추 수경재배에서 용존산소 농도를 7.3 mgL⁻¹ 이상으로 유지하는 것이 생육이 좋았다고 해 7~8mgL⁻¹에서 생육이 가장 높게 나타난 본 실험결과와 같은 경향을 보여 주었다. 기포발생기로 인위적으로 산소를 공급해 주는 것 못지 않게 순환에 의한 폭기식도 용존산소 공급이 많이 이루어져 생육에 증대를 가져오는 것으로 보인다. 宇田(1996)은 배양액을 순환시키면 배양액 정지시에 생기는 용존산소의 농도구배를 해소시켜 뿌리의 산소흡수를 용이하게 한다고 보고해 폭기식에 따른 생육증대효과를 뒷받침해 주고 있다. 앞으로는 온도에 따른 적정 용존산소 함량을 밝히고, 8 mgL⁻¹ 이상의 용존산소 함량에서 상추의 반응과 산소공급 방식에 따른 생육 차이에 관한 연구도 필요할 것으로 생각된다.

Table 3-54. Effect of dissolved O₂ concentration on growth of leaf lettuce at the 36th day after planting in Nutrient Film Technique.

DO conc. (mg L ⁻¹)	Circulation	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)	
					Top	Root	Top	Root
2.0-3.0	NO	19.50b ²	15.25c	12.75b	40.02c	9.42b	2.37b	0.82b
5.0-6.0	NO	24.50a	20.75bc	17.75ab	104.85bc	2.12a	5.72ab	1.53a
6.0-7.0	NO	24.50a	24.00ab	19.25ab	130.40b	24.70a	6.67a	1.66a
7.0-8.0	Yes	26.00a	28.17a	20.17a	207.58a	32.29a	9.06a	1.80a

²Duncan's multiple range test, significant at 5% level.

라. 근권내 온도의 영향

배양액의 수온을 15, 20, 25, 30℃로 조절하여 배양액 온도에 따른 상추 생육 반응을 본 결과, 배양액 온도 20℃에서 자란 상추가 엽수(23.2개), 엽장(21.1cm), 엽

폭(22.7cm)과 생체중(123.9g)에서 높은 수치를 보였고, 반면에 30℃에서 가장 낮은 생육을 나타냈다(Table 3-55). 30℃에서 자란 잎의 생체중은 20℃의 1/3에 불과했다. 적정 온도이상이 되면 광합성에 의한 생산량보다 호흡작용에 의한 소비량이 많아져 생육이 억제된 것으로 보인다(宇田, 1996).

Schwarz(1972)은 일반적으로 채소의 지상부와 뿌리의 최적생장을 위한 지하부 생육적온은 15~25℃가 적합하며 25℃이상에서는 생리장해가 나타나기 쉽다고 하였다. 일반적으로 식물의 무기성분 흡수율은 온도에 따라 증가하는 경향이 있다. 저온에서의 느린 생육은 수분흡수감소와 뿌리의 합성능력 감소 및 뿌리의 세포분화의 감소 때문이다(Marshner, 1983).

Table 3-55. Effect of nutrient solution temperature on growth of leaf lettuce in Nutrient Film Technique.

Solution temp. (°C)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Root length (cm)	Fresh weight (g plant ⁻¹)	
					Top	Root
15	19.8 b ^z	21.1 b	19.1 b	25.0 b	72.1 c	10.2 b
20	23.2 a	25.0 a	22.7 a	38.3 a	123.9 a	12.2 a
25	22.4 ab	24.3 ab	19.5 b	24.5 b	109.8 b	13.0 a
30	15.1 c	16.4 c	16.2 c	16.3 c	34.0 d	5.7 c

^zDuncan's multiple range test, significant at 5% level.

Schwarz(1995)는 배양액 온도가 13℃인 토마토 잎이 28℃것보다 훨씬 작았고 Fe, P 및 Ca결핍증상을 나타내 생육이 저조했다고 했다. 또, 배양액 온도 28℃에서 잎의 크기가 커져 생육이 증가했고 이것은 단위면적당 광합성율과 광합성산물의 전류가 높아졌기 때문이라고 했다. 그러나 본 실험에서는 30℃의 고온이 20℃보다 훨씬 낮은 생육을 보였는데 이것은 작물에 따라 배양액 온도에 대한 반응이 다르기 때문으로 생각된다. 배양액 온도가 높아짐에 따라 영향을 가장 쉽게 받는 뿌리의 호흡작용은 높아지고 용존산소 함량은 부족하게 된다. 뿌리생육이 특히 억

제 받아 30℃의 뿌리 생체중이 20℃의 22%정도였고 뿌리의 흡수저하로 지상부 생육 또한 저조했던 것으로 생각된다. 배양액에 대한 온도처리별로, 생육초기인 정식 10일 후에는 20℃에서 8.97g이고 25℃에서는 11.1g로 25℃에서 생체중이 높았으나 정식 23일 후에는 20℃에서 생체중이 높아지는 경향을 보여주고 있다(Fig. 3-45).

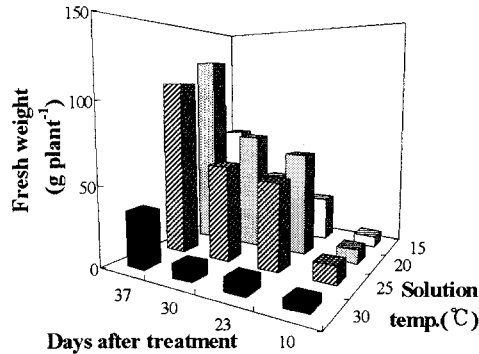


Fig. 3-45. Change of fresh weight as influenced by nutrient solution temperature leaf lettuce

小田 등(1988)은 배양액온도가 30℃이상이 되면 제2인산칼슘(CaHPO₄)의 침전이 생겨 배양액조성에 변화를 일으키므로 잎상추의 생육에는 25℃가 적당하다고 하였다. Morgan 등(1980)은 NFT시스템으로 상추를 재배할 경우 배양액 온도를 20℃까지 높이면 초기 상추 생육이 증가된다고 하여 본 실험과 다소 차이를 보여주고 있다. 이처럼 생육단계에 따른 최적온도 범위가 다르게 나타나고 있어 좀더 정밀한 근권온도 제어가 필요한 것으로 나타났다. 또, 본 실험에서 나타난 결과를 바탕으로, 생육초기에는 25℃, 그 이후에는 20℃로 제어한 처리와 생육 전기간 동안 20℃로 제어한 처리간의 비교실험을 해 볼 필요가 있고 배양액 온도처리에 따른 광합성, 증산량 반응, 무기이온의 흡수관계를 살펴서 최적 온도에 대한 상추의 전체적인 반응에 관한 연구가 필요하다.

마. 배양액내 무기이온 조절

모든 처리에서 생육기간이 지남에 따라 전기전도도(EC)는 점차적으로 낮아졌다. 배양액 분석을 했을 때, N, K, Cu 그리고 Mn등이 결핍수준을 나타내서 이들 무기성분들은 각각 KNO_3 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 를 사용해서 공급해 주었다.

재배기간 동안 총 공급된 비료량을 보면, EC조절구는 다른 처리에 비해 N, P, K는 적게 공급된 것을 보이고 있다(Table 3-56).

Table 3-56. The nutrient concentrations supplied to the nutrient solution depending on control of mineral nutrients. (unit: $\text{mg}10\text{L}^{-1}$)

Treatment ^z	$\text{NO}_3\text{-N}$	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn
EC	83.60	12.50	154.9	36.58	14.87	0.61	0.3
NPK	139.3	22.68	191.9	37.50	15.25	0.62	0.31
Macro	136.4	23.34	224.3	25.39	7.06	0.49	0.24
Macro & Micro	180.3	24.74	232.0	33.63	8.12	1.16	0.68

^zEC: controlling EC, NPK: controlling N, P and K nutrients, Macro: controlling N, P, K, Ca and Mg nutrients, Macro & Micro: controlling N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn and Zn nutrients.

또, EC와 NPK조절구는 다량원소 조절구와 다량원소 및 미량원소 조절구에 비해 Ca, Mg이 상대적으로 많이 공급되었음을 알 수 있다. 따라서, 전이온 농도만을 알 수 있는 EC로만 배양액을 관리하면, N, P, K를 비롯한 미량원소가 모자라게 되고, Ca과 Mg은 과잉으로 공급된다는 것을 알 수 있었다. 이것은 배양액내 무기성분 함량에서도 확인할 수 있었다(Table 3-57). 따라서, 배양액을 장기간 EC로만 관리하게 되면 이온불균형이 초래되므로 각각의 무기이온을 조절해야할 필요가 확인되었다. 또, 과잉으로 공급되는 무기성분을 조절한다면 생산비 절감이 예상되

어 비용에 대해서는 더 자세한 조사가 필요할 것으로 생각된다.

Table 3-57. Nutrient concentrations of the nutrient solutions as influenced by control of mineral nutrients.(unit: mgL⁻¹)

Treatment ²	NO ₃ -N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn
EC	80.96	4.64	119.88	87.50	24.04	0.234	0.070	0.018
NPK	98.56	13.98	184.32	64.70	16.76	0.247	0.131	0.078
Macro	105.6	12.54	183.61	63.90	17.87	0.189	0.110	0.055
Macro & Micro	98.56	12.05	190.08	68.33	15.85	0.553	0.087	0.394

²EC: controlling EC, NPK: controlling N, P and K nutrients, Macro: controlling N, P, K, Ca and Mg nutrients, Macro & Micro: controlling N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn and Zn nutrients.

Cho 등(1997)은 잎상추 NFT재배시 배양액 농도를 EC로만 조절했을 때 배양액 내 Ca와 SO₄는 축적되고 NO₃-N, P, K 함량은 감소한다고 하여 본 실험결과와 같은 경향을 보여 주고 있다. 배양액 내 Ca과 Mg의 축적은 배양액에서의 K흡수와 밀접한 관계가 있다. 칼륨(K)과 같은 1가의 양이온은 칼슘(Ca)과 마그네슘(Mg)같은 2가의 이온보다 흡수속도가 빠르기 때문이고 이러한 관계는 음이온에서도 이루어지고 양이온, 음이온간에도 이루어진다. 예를 들면 칼슘(Ca)과 마그네슘(Mg)이온 같은 양이온흡수는 질산태질소나 염소같은 1가 음이온에 의해 흡수가 저해된다(Diatloff, 1994). 또, Terada 등(1996)은 배양액중의 Ca증가는 K결핍의 원인이 된다고 했다. Zekki 등(1996)은 NFT시스템에서 배양액의 장기간 사용은 작물생육과 수확에 부정적인 영향을 끼친다고 보고했다.

배양액 조절 방법별, 증산량은 처리간에 유의성 있는 차이를 보이지 않았으나 광합성은 다량원소 및 미량원소 조절구에서 가장 높았고 그 다음이 NPK, 다량원소, EC 조절구 순이었다. 기공저항은 다량원소 및 미량원소 조절구에서 가장 낮게 나타났다(Table 3-58).

Table 3-58. CO₂ assimilation rate, transpiration rate and stomatal resistance of butterhead lettuce as influenced by control of mineral nutrients.

Treatment ^z	CO ₂ assimilation ($\mu\text{mole m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Transpiration ($\mu\text{g cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Stomatal resistance (scm^{-1})
EC	10.53 b ^y	12.23	2.953 a
NPK	12.23 a	12.55	2.489 b
Macro	11.01 ab	12.68	2.265 c
Macro & Micro	13.14 a	12.79	2.185 c

^zEC: controlling EC, NPK: controlling N, P and K nutrients, Macro: controlling N, P, K, Ca and Mg nutrients, Macro & Micro: controlling N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn and Zn nutrients.

^yDuncan's multiple range test, significant at 5% level.

Table 3-59. Growth characteristic of butterhead lettuce as influenced by control of mineral nutrients.

Treatment ^z	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (gplant ⁻¹)		Dry weight (gplant ⁻¹)	
				Top	Root	Top	Root
EC	14.5 b ^y	18.5 b	42.0 b	163.8 c	20.7 b	6.48 b	1.26 b
NPK	16.6 a	19.9 a	42.0 b	173.4 b	22.7 a	6.50 b	1.41 a
Macro	15.8 a	19.5 a	42.8 b	182.0 ab	23.6 a	6.69 ab	1.48 a
Macro & Micro	15.7 a	20.5 a	46.5 a	195.0 a	23.4 a	6.82 a	1.48 a

^zEC: controlling EC, NPK: controlling N, P and K nutrients, Macro: controlling N, P, K, Ca and Mg nutrients, Macro & Micro: controlling N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn and Zn nutrients.

^yDuncan's multiple range test, significant at 5% level.

전반적으로 EC조절구에서 자란 상추가 가장 낮은 생육을 보였는데 이는 EC로 양액을 조절했을 때 N, P, K가 낮게 유지되었기 때문인 것으로 보여진다. 상추 생체중과 건물중은 다량원소 및 미량원소 조절구가 가장 좋았지만 엽수, 엽장 그리고 엽폭은 처리간 차이를 보이지 않았다(Table 3-59).

이상의 결과로 보아 다량원소 및 미량원소 조절구에서 다량원소와 미량원소의

적정수준 유지가 가능하여 상추생육증가와 비료절감에 효과가 있는 것으로 보여진다.

바. 식물공장의 급액제어

식물공장에는 일반 양액재배 농가와와는 달리 급액 제어 방법을 좀 더 세밀히 이루어져야 될 것으로 본다.

Table 3-60. Effect of supply methods of nutrient solution on net CO₂ assimilation rate and stomatal resistance at 21 days after treatment.

Supply methods of nutrient solution (cal · cm ⁻²)	Net CO ₂ assimilation rate (μ mol · m ⁻² · s ⁻¹)	Stomatal resistance (s · cm ⁻¹)	Total Chlorophyll (mg · g ⁻¹)
Time clock	9.62bc	4.50a	14.4a
5	12.20a	0.38c	13.2a
10	10.58b	0.40bc	13.7a
15	9.85b	0.42b	13.6a
20	8.41c	0.43b	14.3a
30	10.26b	0.42b	11.1b
Significance			
Supply methods	**	**	*

NS,*,**Nonsignificant or significant at P<0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test(P<0.05)

급액이 5cal · cm⁻²일 때 광합성이 가장 높았고, 10, 12cal · cm⁻² 와 타이머에 의한 제어에서 차이가 없었다. 증산량은 5, 10, 15 및 타이머에 의한 제어에서 차이가 없이 높게 나타났다. 엽록소 함량은 30cal · cm⁻² 에서 가장 낮았고 CO₂ 한 분자를 고정하는데 소요되는 수분함량은 처리간에 큰 차이를 보여주지 않았으나 5~15cal · cm⁻² 와에서 일반적으로 높게 나타났다. 상추의 초기생육은 10~15cal · cm⁻²에서 높았고, 후기생육은 5~20cal · cm⁻² 와 타이머 제어에서 높은 생육량과 품질을 나타냈다. 그러나 타이머와 30cal · cm⁻² 급액 제어구에서 잎끝 마름증(Tipburn)현상이 심하게 나타나 결국 5~20cal · cm⁻² 범위에서 적산일사량에 따라 제어하는 것이 가장 바람직할 것으로 보였다.

Table 3-61. Effect of supply methods of nutrient solution on transpiration rate and diffusive resistance, water use efficiency(WUE) of lettuce at 21 days after treatment.

Supply methods of nutrient solution (cal · cm ⁻²)	Transpiration rate (μ g · cm ⁻² · s ⁻¹)	Diffusive resistance (s · cm ⁻¹)	WUE (mmolCO ₂ · mol ⁻¹ H ₂ O)
Time clock	9.87a	1.38b	29.0
5	10.31a	1.28b	34.2
10	10.07a	1.32b	30.6
15	9.87a	1.43b	33.0
20	10.97c	1.28b	29.6
30	8.18b	1.76a	30.1
Significance			
Supply methods	**	**	NS

NS,*,**Nonsignificant or significant at P<0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test(P<0.05)

Table 3-62. Effect of supply methods of nutrient solution on lettuce growth at 15 days after treatment.

Supply methods of nutrient solution (cal · cm ⁻²)	No. of leaves	Leaf	Leaf	Fresh weight		Dry weight	
		Length (cm)	width (cm)	(g · plant ⁻¹)		(g · plant ⁻¹)	
				Shoot	Root	Shoot	Root
Time clock	20.14bc	18.21ab	12.53ab	55.14a	10.14a	3.49ab	0.75ab
5	20.29c	17.47b	11.37bc	39.14b	8.14b	2.70bc	0.68b
10	26.29ab	19.40a	13.44a	67.00b	10.00a	4.01a	0.78a
15	24.57ab	19.79a	12.60ab	62.71b	9.86a	3.23ab	0.69b
20	27.14a	19.29a	12.46ab	54.29b	9.57a	3.37ab	0.72ab
30	19.43c	14.96c	10.33c	31.86a	9.29ab	2.28c	0.75ab
Significance							
Supply methods	**	**	**	**	NS	**	NS

NS,*,**Nonsignificant or significant at P<0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test(P<0.05)

Table 3-63. Effect of supply methods of nutrient solution on lettuce growth at 25 days after treatment.

Supply methods of nutrient solution (cal · cm ⁻²)	No. of leaves	Leaf Length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g · plant ⁻¹)		Dry weight (g · plant ⁻¹)		Tipburn (%)
				Shoot	Root	Shoot	Root	
Time clock	40.0	21.1	14.0	151.6	28.77	8.32	1.29	24
5	40.3	21.3	14.5	171.5	30.00	9.37	1.29	0
10	42.4	21.7	14.6	154.8	27.37	9.19	1.21	0
15	40.8	21.5	13.8	152.3	28.10	9.09	1.39	0
20	39.5	22.3	14.5	153.8	26.40	8.32	1.24	0
30	36.0	19.8	12.8	113.9	25.58	6.30	1.11	36
Significance								
Supply methods	*	*	*	**	*	*	*	**

NS,*,**Nonsignificant or significant at P<0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test(P<0.05)

Table 3-64. Mineral concentration in root zone supplied with nutrient based on solar radiation and time clock after treatment.

Supply methods of nutrient solution (cal · cm ⁻²)	Nutrient concentration(ppm)			
	P	K	Ca	Mg
Time clock	14.86	178.2	66.28	27.28
5	15.48	143.5	60.93	26.83
10	21.46	152.8	64.17	28.94
15	18.24	151.2	64.56	26.83
20	15.44	140.0	65.29	27.20
30	15.84	144.0	61.92	30.00

NS,*,**Nonsignificant or significant at P<0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test(P<0.05)

3. 적요

엽채류의 수경재배는 작기를 단축할 수 있고 일정한 규격의 채소를 대량생산할 수 있는 식물공장 형태로의 전환이 필수적이고 경제적, 효율적인 생산을 위해 지하부 환경의 최적 관리가 요구된다.

본 실험은 상추 수경재배시 지하부 환경요인이 상추의 생육에 미치는 영향을 바탕으로 식물공장에서 활용가능성이 큰 상추의 최적 근권환경을 알아보고자 수행하였다.

근권부 환경조건으로는 배양액의 pH, EC, 온도 및 용존산소를 각각 여러 가지 수준으로 실험하였고, 배양액 무기이온 제어 실험은 EC(EC조절), NPK(N, P, K 조절), Macro(N, P, K, Ca, Mg조절) 및 Macro & Micro(N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn 조절)의 4가지 처리를 하였다. pH 3.0을 제외한 pH 4.0~8.0에서 가시적인 생리장해 없이 양호한 생육을 나타냈으나 광합성, 증산량 및 무기이온 흡수를 고려한 상추의 최적 배양액 pH는 pH 5.5~6.0였다. 배양액 전기전도도를 0.8~3.6mScm⁻¹로 처리하였을 때, 고농도에서는 Ca결핍으로 인한 잎끝마름증이 나타나 품질이 저하되었고 생육과 광합성이 높은 EC 1.2~1.6mScm⁻¹가 최적인 것으로 나타났다. 배양액내 용존산소 함량이 증가할수록 증산량, 광합성 및 생육이 높게 나타났다. 배양액내 용존산소 함량이 가장 높게 나타났다. 생육초기에는 25℃, 그 이후에는 20℃가 생육량이 높게 나타나 적정 배양액 온도임을 알 수 있었다.

장기간 동일 배양액을 전기전도도(EC)로만 관리했을 경우, N, P, K 결핍과 Ca, Mg 과잉과 같은 이온불균형이 발생했으므로 이를 해소하기 위해 배양액의 무기이온을 조절했고 다량원소 및 미량원소를 조절한 구에서 광합성, 증산량 및 생육량이 가장 높게 나타나 무기이온조절이 생육증대효과가 있음을 알 수 있었다. 식물공장내 급액제어에 있어서는 timer 제어보다는 5~20cal·cm⁻¹범위의 적산 일사량에 따른 제어가 고품질 엽채류 생산이 가능할 것으로 판단되었다.

이런 결과를 바탕으로 상추 식물공장에서 지하부의 최적관리가 가능하여 상추의 주년 계획 생산, 공장적 대량생산, 청정생산 및 기능성 채소 생산을 효율적으로 재배를 할 수 있을 것으로 보인다.

제 3 절 식물공장내 환경과 생육단계에 따른 재배식물의 배양액관리 기술개발

1. 재료 및 방법

Lettuce plants (*Lactuca sativa* L. cv.) were germinated individually in polyurethane foam cubes. When the third leaf of these plants was fully expanded, these plants were mounted into plastic plates, each having five holes, and placed on a 2 liter container filled with the nutrient solution. The samples were hydroponically grown for different experiments.

The concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, P, K, Ca and Mg in the nutrient solution were 10.6, 1.1, 2.0, 6.7, 3.5 and 2.0 me L^{-1} , respectively. The concentration of Fe-EDTA, and micro-elements were 2.0 me L^{-1} for Fe, 0.5 me L^{-1} for B, 0.3 me L^{-1} for Mn, 0.2 me L^{-1} for Zn, 0.05 me L^{-1} for Cu and 0.05 me L^{-1} for Mo. During these experiments, the solution was aerated continuously and was replaced every week.

Different conditions of PPF, temperature, humidity and CO_2 concentration were given to determine optimum aerial environments for the leaf lettuce.

가. 광환경에 따른 배양액 관리 (Light intensity)

Leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *crispa* cv. Grand rapids) was grown under different PPFs of 100, 150, 200 and 300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ which were maintained by controlling the distance between the plant and the lamps. Light was supplied by the metal halide and the high pressure sodium lamps. Light

intensity was measured at the top of the plant using portable quantum sensor (Skye Instruments, SKP 2200). Different CO₂ concentrations of 400, 1000, 2000 and 3000 mg L⁻¹ were treated to leaf lettuce in the growth chamber. Other conditions, temperature and RH, were maintained at 22/20 °C (day/night) and 70 ± 5%, respectively. Electrical conductivity (EC) and pH were adjusted to 1.8 mS cm⁻¹, 5.8 ± 2 respectively.

Another experiment was conducted to investigate interactive effect between PPF and EC levels on the growth of red lettuce. In this case, reddish leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *crispa* cv. 'Ttuksom') was grown under different with PPFs of 150, 250 μmol m⁻²s⁻¹ with nutrient levels with EC values of 1.2, 1.8 and 2.4 mS cm⁻¹. Other environment conditions were the same as explained in the experiment on the temperature.

Growth characteristics such as number of leaves, leaf length, leaf width, leaf fresh weight, root fresh weight, leaf dry weight, root dry weight were measured.

Relative content of chlorophyll was measured with portable chlorophyll meter (Minolta, SPAD 502). Content of anthocyanin was measured with a UV spectrometer at 530 nm after leaf lettuce was extracted with 5 ml of 1% HCL-MeOH at 4 °C in the dark room on the 30th day from the transplant.

Transpiration rate, CO₂ assimilation rate and stomatal resistance of the plantlets were observed with a steady state porometer (LI-COR, Li-1600) and with a portable photosynthesis system (LI-COR, LI-6200).

나. 온도 환경에 따른 배양액 관리(Air temperature)

Leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *crispa* cv. Ttuksom reddish leaf margins) was sown in the polyurethane foam plugs and were grown in the growth chamber. Air temperatures (day/night) were set at 14/10 °C, 18/14 °C,

22/18 °C and 26/22 °C with RH 70±5%. PPFDs were adjusted to 150 or 250 $\mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$. Different nutrient levels with EC values of 1.2, 1.8 and 2.4 mS cm^{-1} were treated to leaf lettuce.

Growth response, photosynthetic characteristics, the content of chlorophyll and anthocyanin of plant were observed 30 days later as explained in the experiment on the light intensity.

The visual quality score(VQS) by Kader et al.(1973) was adopted to evaluate quantitatively harvested leaf lettuce quality.

다. 상대습도에 따른 배양액 관리(Relative humidity (RH))

Leaf lettuce (*Lactuca sativa*. *L. var* *crispa* cv 'Manavert') were sown in the polyurethane foam plugs and was grown in the growth chamber. The humidity conditions in the growth chamber used for the experiment were 40±5%, 60±5% and 80±5%. Carbon dioxide concentration was controlled to 800 mg L^{-1} . PPFD and air temperature were adjusted to 200 $\mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$ and 20/16°C, respectively.

Growth response and photosynthetic characteristics of the plant were observed on the after 23th day from transplanting that explained in the experiment on the light intensity.

라. CO₂ 환경에 따른 배양액 관리(Carbon dioxide (CO₂))

Leaf lettuce (*Lactuca sativa* *L. var. crispa* cv. Grand rapids) was grown under different CO₂ concentrations of 400, 1000, 2000 and 3000 mg L^{-1} with PPFDs of 100, 150, 200 and 300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Different nutrient levels of 1.2, 1.8, 2.4 and 4.8 mS cm^{-1} were treated to leaf lettuce in the growth chamber.

Carbon dioxide gas was supplied using a CO₂ controller (DGT volmatic, Model 3600).

Growth response, photosynthetic characteristics and chlorophyll content of the plant were observed on the 30th day from transplanting as explained in the experiment on the light intensity.

마. 근권내 영양 조건에 따른 상추의 생체반응 및 배양액 관리

상추의 배양액내 다량원소(N, P, K, Ca, Mg)함량 변화에 따른 광합성과 증산량을 알아보고자 실험을 수행하였다. 담액경(DFT)으로 정식 후 7일간 정상적인 양액(SCU)으로 재배한 후 조정된 양액을 처리하였다. 조정용 양액은 다량 원소중 N은 0, 10, 50, 100, 150, 200, 300mg · l⁻¹, Pdms 0, 10, 20, 40, 80, 160mg · l⁻¹ K은 0, 10, 50, 100, 150, 200mg · l⁻¹ Ca은 0, 10, 40, 80, 120, 160mg · l⁻¹ 그리고 Mg은 0, 10, 20, 40, 80, 120, 160mg · l⁻¹로 조절하였다. 처리후 25일 쯤, 각 처리별로 광합성, 증산량을 측정하였다.

바. 생육단계별 재배환경에 따른 배양액 관리

공시작물로는 반결구 상추 'Omega'를 사용하였다. 최아를 위해 습식 처리한 거름종이를 페트리디쉬에 넣고 파종한 이후 발아가 되면, 우레탄 스폰지에 이식한 후 생육 초기와 중기로 나누어서 각각 본엽이 3-4매, 6-7매가 전개했을 때 재배 베드에 정식하였다.

유묘의 관리를 위한 배양액은 서울시립대학교 환경원예학과 식물환경조절공학 실험실에서 개발한 잎상추 배양액(UOS; N 11.7, P 2.0, K 6.7, Ca 3.5, Mg 2.0 me · L⁻¹, Fe 2.0, Cu 0.1, B 0.5, Mn 0.3, Zn 0.3, Mo 0.05 ppm)을 사용하였으며 이때 pH는 5.5~6.0, EC는 1.2, 1.8, 2.4 dS · m⁻¹로 처리하였다.

생육조사는 초기, 중기에 걸쳐 모두 2번씩 하였고 초기는 본엽이 3~4매 출현한 후, 중기는 본엽이 6~7매 출현한 후 처리하여 7일 후에 조사하였다.

1) 온도 환경에 따른 생육 단계별 배양액 관리

환경제어가 이루어지는 growth chamber에서 기온을 18, 22, 28℃로 처리하였고 광은 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로, CO₂는 700~800 ppm으로 유지하였다. 주·야간의 길이는 16, 8 시간으로 조정하였다.

2) 습도 환경에 따른 생육 단계별 배양액 관리

환경제어가 이루어지는 growth chamber에서 습도를 40, 60, 80%로 처리하였다.

3) 광 환경에 따른 생육 단계별 배양액 관리

벤노 온실 내에서 반결구 상추 서울시립대 배양액을 사용하였다. 차광률은 0, 60, 80%로 처리하였다.

4) CO₂ 환경에 따른 최적 배양액 관리

환경제어가 이루어지는 growth chamber에서 실험을 실시하였다. CO₂ 농도를 400, 1000, 2000 ppm으로, 광은 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로, CO₂는 700~800 ppm으로 유지하였다. 주야간의 길이는 16, 8 시간으로 조정하였다.

사. 재배환경 및 생체정보에 따른 과채류 배양액 관리

1) 근권내 pH에 따른 오이 생체반응 및 배양액 관리

근권내 pH변화에 따른 오이(은성백다다기)의 생체반응을 계측하기 위해 파종한 지 30일된 오이묘를 이용해 실험에 들어갔다. 담액수경방식을 이용하였으며, pH

5.8 EC 1.8을 기준으로 pH증가 및 pH감소에 따른 오이의 생체반응을 살펴보았다. 생체계측기로는 광합성 측정기(Li-6200), Porometer (Li-1600), 엽록소 측정기 (Minolta 502)를 사용하여 오이(은성백다다기)의 광합성과 증산량, 기공저항, 확산저항 및 엽록소함량등을 측정하였다.

pH증가에 따른 오이의 생체반응을 보기위해 pH를 6.5→ 7.0→ 7.5→ 8.0→ 8.5→ 9.0으로 1시간 30분 간격으로 측정하였고, pH감소에 따른 오이의 생체반응을 보기위해 5.5→5.0→4.5→4.0→3.5→3.0으로 1시간 30분 간격으로 낮추면서 측정하였다. 측정은 처리후 1시간후에 각각 측정하였으며, 측정에 소요되는 시간은 약 30분정도 되었다. 최종처리인 pH 9.0과 3.0처리후 장기적인 반응을 보기위해 24시간, 48시간, 72시간후에도 측정해 보았다.

2) 근권내 EC에 따른 오이 생체반응 및 배양액 관리

파종한지 30일 된 오이(은성백다다기)를 담액수경방식에 정식한후 pH 5.8 EC 1.8mS/cm를 기준으로 EC증가 및 EC감소에 따른 오이의 생체반응을 살펴보았다. 생체계측기로는 광합성 측정기(Li-6200), Porometer (Li-1600), 엽록소 측정기 (Minolta 502)를 사용하였으며, 광합성, 기공저항, 증산량, 확산저항 및 엽록소함량 변화등의 생체반응을 조사해 보았다.

근권내 EC증가에 따른 생체반응을 보기 위해 EC를 2.0→ 4.0→ 6.0→ 8.0→ 10.0 → 12.0mS/cm로 1시간 30분 간격으로 증가시키면서 계측해보았고, EC감소에 따른 오이의 생체반응을 보기위해 1.5→ 1.0→ 0.5mS/cm로 3시간 간격으로 감소시키면서 생체반응을 살펴보았다. EC증가는 처리후 1시간후에 측정하였으며, EC감소는 처리후 1시간후 및 3시간후에도 측정하였다. 최종적으로 EC 12.0mS/cm와 0.5mS/cm로 처리한후 24시간후, 48시간후, 72시간후에도 각각 측정하여 장기적인 생체 반응도 살펴보았다.

3) 근권내 수분 Stress에 따른 오이 생체반응

근권내 수분 stress로 인한 오이(은성백다다기) 생체 반응을 비파괴적인 방법으로 계측하기 위해 과중 30일 된 오이를 담액수경방식 베드에 정식한 후 pH 5.8 EC 1.8mS/cm로 배양액을 조성한 실험구를 기준으로 수분stress를 유도한 실험구와 비교해 생체계측기기인 광합성 측정기(Li-6200), Porometer (Li-1600), 엽록소 측정기(Minolta 502)를 사용하여 광합성, 기공저항, 증산량, 확산저항, 엽록소 함량 변화등을 계측하였다.

근권내 수분 stress에 따른 오이의 생체반응을 보기위해 NaCl을 처리함으로써 수분Stress를 유도, 측정해 보았다.

기준배양액에 NaCl을 처리해 EC를 2.0→4.0→6.0→8.0→10.0→12.0mS/cm로 서서히 증가시킴으로써 수분Stress에 따른 반응을 살펴보았다. 측정은 1시간 30분 간격으로 하였으며, 처리후 1시간후에 하였고, 측정시간은 30분정도 소요되었다. 24시간후, 48시간후, 72시간후에도 측정해 장기적인 반응도 기준처리구와 비교하여 계측해보았다.

4) 광환경에 따른 오이 생체반응 및 배양액 관리

차광으로 인한 오이(은성백다다기) 생체에 미치는 영향을 계측하여 환경제어에서 활용 가능성이 있는지를 보고자 하였다. 생체계측기로는 광합성 측정기(Li-6200), Porometer (Li-1600), 엽록소 측정기(Minolta 502)를 사용하였다.

작물 생산에 있어서 광은 지상부 환경중에서도 광합성과 직접적으로 연관되기 때문에 상당히 중요하게 다루어지고 있다. 본 실험은 차광에 의한 오이의 생체반응을 보기위해 무차광 상태를 기준으로 보고 80%차광을 처리하였다. 80%차광에 따른 오이의 생체반응을 처리3시간후부터 1시간 30분 간격으로 처리 9시간 후 까지 측정하였으며, 24시간후 48시간후 72후에 측정하여 장기적인 반응도 살펴보았다.

5) 근권 온도에 따른 오이 생체반응 및 배양액 관리

재배식물의 생산성과 품질을 극대화하기 위한 방안으로, 근권온도변화로 인한 오이(은성백다다기) 생체 반응을향을 계측하여 근권환경제어에 활용 가능성이 있는지를 보고자 하였다. 생체계측기로는 광합성 측정기(Li-6200), Porometer (Li-1600), 엽록소 측정기(Minolta 502)를 사용하였다.

근권온도는 상온의 수온(약 17-20℃)을 기준으로 보고. 근권온도감소는 얼음을 이용하여 수온을 냉각시켰으며, 근권온도 증가는 전열선을 이용해 43℃까지 서서히 온도를 증가시켰다. 1.5시간 간격으로 광합성 및 증산량을 측정하였다.

2. 결과 및 고찰

가. 광환경에 따른 배양액 관리(Light intensity)

Plant growth increased with increasing light intensity (PPFD) (Tables 3-65 and 67). Leaf length, leaf width, fresh weight and dry weight increased with increasing PPFD up to $300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. The highest fresh weight and highest dry weight were observed at the PPFD of 200 and $300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, respectively. Little growth differences were found among the PPFDs of 150, 200 and $300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Table 3-65).

On the other hand, there has been a report on the negative effect of high PPFD by Tibbits et al (1983) that the shoot dry weight of 'Grand Rapids' lettuce was not enhanced by raising PPFD from $320 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ to $720 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Table 3-65. Effect of light intensity on the growth of leaf lettuce "Grand rapids" in the plant factory.

PPFD ($\mu\text{ mol cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf wt. (g plant ⁻¹)		Leaf dry wt. ratio (%)	Root fresh wt. (g plant ⁻¹)	Relative content of chlo rophyll
				Fresh	Dry			
100	11.3	20.4a	13.8	24.92b	1.19c	4.77b	4.37b	13.0c
150	13.0	18.4a	16.5	40.78ab	2.19bc	5.37b	7.99a	16.7bc
200	14.0	17.9ab ^z	17.9	50.32a	2.82ab	5.60b	10.10a	20.7b
300	13.1	13.1a	13.1	43.75ab	3.35a	7.66a	10.44a	24.9a

^z Duncan's multiple range test, significant at the 5%.

Table 3-66. Effect of light intensity and nutrient level on the growth of reddish leaf lettuce "Ttuksom" in the plant factory.

PPFD ($\mu\text{ mol cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$)	EC (mS cm ⁻¹)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf wt. (g plant ⁻¹)		Root wt. (g plant ⁻¹)		Leaf dry wt. ratio (%)
					Fresh	Dry	Fresh	Dry	
150	1.2	20.6	15.4	17.4	67.0	3.41	11.5	0.75	5.08
	1.8	18.8	15.9	17.6	67.7	3.59	13.0	0.60	5.30
	2.4	20.0	15.0	15.6	75.1	3.37	9.3	0.69	4.48
250	1.2	21.8	14.1	16.7	80.1	4.93	16.5	1.25	6.15
	1.8	24.8	14.7	18.3	89.9	5.91	15.9	1.58	6.57
	2.4	21.8	15.4	16.5	71.8	4.73	12.8	0.93	6.58

Significance

PPFD	NS	NS	NS	**	**	*	**	NS
EC	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
PPFD × EC	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	NS

NS,*,** Nonsignificant or significant at P < 0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P < 0.05).

He also reported that chlorophyll content of leaf lettuce 'Grand rapids' was higher at 700 $\mu\text{ mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ than at 320 $\mu\text{ mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$. A similar result was

obtained from this experiment. increased content of chlorophyll and anthocyanin was observed as PPFD increased (Tables 3-65 and 67).

The contribution of PPFD to the plant growth was shown to significant but the growth of leaf lettuce was not different significantly between nutrient levels.

The plant grown under different solution ECs and different PPFD levels showed growth differences. The best results of plant growth expressed as parameters such as leaf length, leaf width, fresh weight and dry weigh of lettuce were obtained in with EC of 1.8 mS cm⁻¹ at higher light intensity (250 μmol m⁻²s⁻¹) and with EC of 2.4 mS cm⁻¹ at low light level (150 μmol m⁻²s⁻¹), respectively (Table 3-66). The interactive effects of light intensity and nutrient levels to plant growth were not significant Their effect on the plant growth was correlative except for root weight.

Table 3-67. Effect of light intensity and nutrient level on the relative content of chlororophyll and anthocyanin of reddish leaf lettuce "Ttuksom" in the plant factory.

PPFD (μmol cm ⁻² s ⁻¹)	EC (mS cm ⁻¹)	Reative content of chlorophyll ^z	Content of antocyanin (μg g ⁻¹ FW)
150	1.2	16.33	18.8
	1.8	19.43	19.6
	2.4	18.63	29.2
250	1.2	18.35	31.2
	1.8	20.03	32.9
	2.4	20.98	33.9
Significance			
PPFD		NS	**
EC		NS	NS
PPFD X EC		NS	NS

NS,** Nonsignificant or significant at P < 0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P < 0.05).

^z Chlorophyll meter SPAD value.

Table 3-68. Effect of light intensity on transpiration rate, CO₂ assimilation rate and stomatal resistance of leaf lettuce "Grand rapids" on the 16th day from treatment in the plant factory.

PPFD ($\mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\mu\text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	CO ₂ assimilation rate ($\mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Stomatal resistance (s cm^{-1})
100	2.65b ^z	6.28a	1.53a
150	2.90ab	6.99a	1.20a
200	3.46ab	8.05a	0.55a
300	3.87a	8.42a	0.74a

^z Duncan's multiple range test, significant at the 5%.

Table 3-69. Effect of light intensity and nutrient level on transpiration rate, CO₂ assimilation rate and stomatal resistance of reddish leaf lettuce "Ttuksom" on the 30th day from treatment in the plant factory.

PPFD ($\mu\text{ mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	EC (mS cm^{-1})	Transpiration rate ($\mu\text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	CO ₂ assimilation rate ($\mu\text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Stomatal resistance (s cm^{-1})
150	1.2	8.15	8.90	1.33
	1.8	8.54	9.56	1.14
	2.4	8.24	8.87	1.08
250	1.2	9.04	8.87	1.08
	1.8	9.40	9.33	1.13
	2.4	9.26	8.36	1.04
Significance				
PPFD		NS	NS	NS
EC		NS	NS	NS
PPFD × EC		NS	NS	NS

^{NS,*,**} Nonsignificant or significant at $P < 0.05$ or 0.01 , respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

Increased rates of transpiration and CO₂ assimilation were also observed on the leaves applied with PPFD over 200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Table 3-68). Effect of PPFD and EC on CO₂ assimilation and transpiration rate of the leaf lettuce was not found (Table 3-69).

Consequently, the plant factory enabled mass-production of high quality leaf lettuce under much higher PPFD (above 200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) than under normal PPFD.

나. 온도환경 및 광환경과의 복합환경 요인에 따른 배양액 관리 (Air temperature)

The plants under 26/22°C showed the best growth expressed as leaf number, leaf length, leaf fresh weight and leaf dry weight (Table 3-70). Leaf lettuce grown at 26/22°C for day/night air temperature treatment showed the highest fresh weight (122.57 g plant⁻¹). But leaf shape was longer than and visual quality was inferior to the ones under 22/18°C day/night air temperature treatment (Tables 6, 7, 8 and 9). Moorby and Grave (1980) demonstrated short and wide leaves were observed on lettuce when the temperature at initiation was low, while at high temperature the shape of the leaves were long and narrow. Bolting occurred at 26/22°C treatment.

Meanwhile, denser heads were associated with low temperatures while less dense heads were primarily associated with higher temperatures (Werr et al., 1992). Increasing temperatures enhanced consistently early maturity (Werr et al., 1996) and initial growth of leaf lettuces (Park et al., 1991).

Table 3-70. Effect of temperature on the growth of reddish leaf lettuce "Ttuksom" in the plant factory.

Temp. day/night (°C)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf wt. (g plant ⁻¹)		Root wt. (g plant ⁻¹)		Leaf dry wt. ratio (%)	Visual quality score ^y
				Fresh	Dry	Fresh	Dry		
14/10	11.7c ^z	10.0c	14.7b	27.0	2.35	12.15	1.66	9.39	7.4
18/14	18.5b	15.5b	19.0a	60.4	3.71	12.45	0.87	6.13	7.6
22/18	25.8a	16.7ab	17.6ab	94.2	4.87	13.02	0.90	5.17	8.8
26/22	29.3a	17.8a	18.1a	122.5	6.88	1408	0.89	5.52	5.1

^z Duncan's multiple range test, significant at the 5%.

^y Excellent: 9, marketable: 5, bad: 1.

Both chlorophyll and anthocyanin contents were decreased as air temperature increased from 14/10°C to 26/22°C (Table 3-71).

The correlative effect of temperature and PPFd was observed on growth of leaf lettuce (Table 3-72).

The leaf lettuces grown under different EC levels at the same temperature were not significantly different. The effect of temperature and EC on the growth of lettuce was highly significant except that on root weight and leaf dry weight (Table 3-73). When temperature increased up to 22°C, the growth rate of leaf lettuce was still high under low electric conductivity level (1.2 mS cm⁻¹).

Table 3-71. Effect of temperature on the relative content of chlorophyll and anthocyanin of reddish leaf lettuce "Ttuksom" in the plant factory.

Temperature day/night(°C)	Relative content of chlorophyll	Content of anthocyanin (µg g ⁻¹ FW)	Visual quality score ^y
14/10	21.5a ^z	44.6a	7.8
18/14	19.4b	21.1b	7.6
22/18	18.4b	30.1b	7.6
26/22	16.4b	18.1b	5.4

^z Duncan's multiple range test, significant at the 5%.

^y Excellent: 9, marketable: 5, bad: 1.

Transpiration rate and CO₂ assimilation rate were also the greatest when the plant were grown at 26/22°C (Table 3-74). But transpiration rate and CO₂ assimilation rate of plant growth at 26/22°C were not significantly different from there at 22/18°C.

Even if optimum temperature range for leaf lettuce was known to be 15~20°C, the results of this experiment was rather different. In general, the optimum temperature for the growth of lettuce were 17~28°C for day and 3~12°C for night (Kimbell et al., 1967). Temperature below and above the ranges were not considered to be suitable for the production of quality lettuce in the USA (Whitaker et al., 1974).

The photosynthetic temperature response of the whole leaves was also quite sensitive to the light intensity (Berry and Bjorkman, 1980). They also reported that the maximum temperature dependence was observed under rate-saturating light intensities. Therefore, the reason for higher growth and photosynthetic rate of leaf lettuce at 26/22°C and 22/18°C temperature in plant factory could be explained by the proper light intensity and humidity conditions suitable for plant growth.

Considering the visual quality, the best result was obtained at the 22/18°C treatment (Tables 3-70, 71, 72 and 73). Therefore optimum temperature range for leaf lettuce in the plant factory was determined to be 22/18°C day/night air temperature.

Table 3-72. Effect of temperature and light intensity on the growth of reddish leaf lettuce "Ttuksom" in the plant factory.

Temp. day/night (°C)	PPFD ($\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf wt. (g plant ⁻¹)		Root wt. (g plant ⁻¹)		Leaf dry wt. ratio (%)	Visual quality score ^z
					Fresh	Dry	Fresh	Dry		
14/10	150	9.7	10.6	12.4	16.92	1.25	8.05	0.81	8.35	7.4
	250	12.0	9.8	14.3	24.65	2.33	12.65	1.60	10.27	
18/14	150	16.3	16.0	19.2	53.93	2.96	10.10	0.71	5.54	7.6
	250	20.7	15.0	18.7	66.94	4.45	14.79	1.03	6.72	
22/18	150	27.7	16.4	17.8	94.38	4.22	10.42	0.60	4.49	8.1
	250	23.8	17.0	17.3	94.16	5.52	15.62	1.21	5.85	
26/22	150	24.8	18.6	18.0	108.3	5.39	10.78	0.60	4.95	5.3
	250	33.8	17.0	18.2	136.7	8.38	17.37	1.18	6.09	
Significance										
Temperature		**	**	**	**	**	NS	NS	**	
PPFD		NS	NS	NS	NS	**	**	**	NS	
Temp. × PPFD		**	**	**	**	**	**	**	**	

NS, **, * Nonsignificant or significant at $P < 0.05$ or 0.01 , respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

^z Excellent: 9, marketable: 5, bad: 1.

Table 3-73. Effect of temperature and nutrient levels on the growth of reddish leaf lettuce "Ttuksom" in the plant factory.

Temp. day/night (°C)	EC (mS cm ⁻¹)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf wt. (g plant ⁻¹)		Root wt. (g plant ⁻¹)		Leaf dry wt. ratio (%)	Visual quality score ^z
					Fresh	Dry	Fresh	Dry		
14/10	1.2	13.5	10.2	14.5	21.19	1.86	13.14	1.23	9.37	
	1.8	9.5	10.7	15.7	28.21	2.31	9.90	1.22	8.14	7.4
	2.4	10.0	9.8	10.0	12.96	1.22	8.02	1.18	10.42	
18/14	1.2	17.0	16.1	19.8	58.08	3.29	14.91	0.86	5.67	
	1.8	19.5	15.2	18.2	63.39	3.97	11.57	1.07	6.31	7.6
	2.4	20.0	15.3	19.2	59.83	3.87	10.89	0.68	6.42	
22/18	1.2	24.5	16.0	17.2	94.48	4.78	13.70	0.88	5.06	
	1.8	29.5	16.4	18.1	94.26	5.53	14.26	1.21	5.83	8.4
	2.4	23.5	17.7	17.4	94.08	4.31	11.11	0.63	4.63	
26/22	1.2	30.0	16.7	16.8	120.48	6.76	14.43	1.06	5.46	
	1.8	28.5	18.9	20.0	129.40	7.35	13.50	0.85	5.54	5.6
	2.4	30.0	18.4	17.6	117.82	6.55	14.30	0.77	5.56	
Significance										
Temperature		*	**	**	**	NS	NS	**	**	
EC		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
Temp. × EC		*	**	**	**	NS	NS	NS	NS	

NS,*,** Nonsignificant or significant at P < 0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P < 0.05).

^z Excellent: 9, marketable: 5, bad: 1.

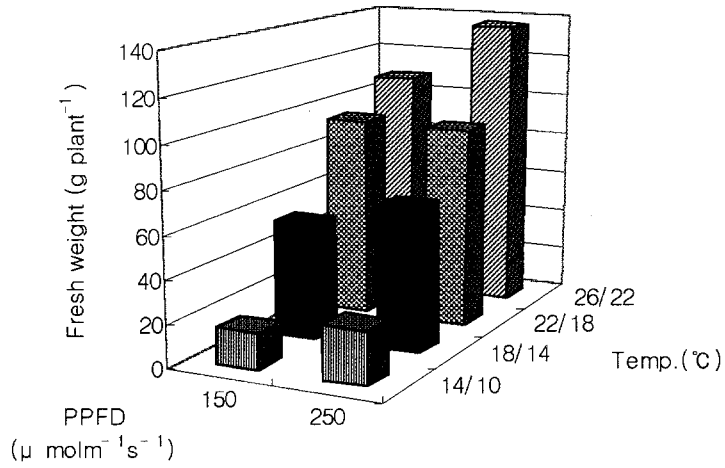


Fig 3-50. Effect of temperature and light levels on the fresh weight of reddish leaf lettuce "Ttuksom" in the plant factory.

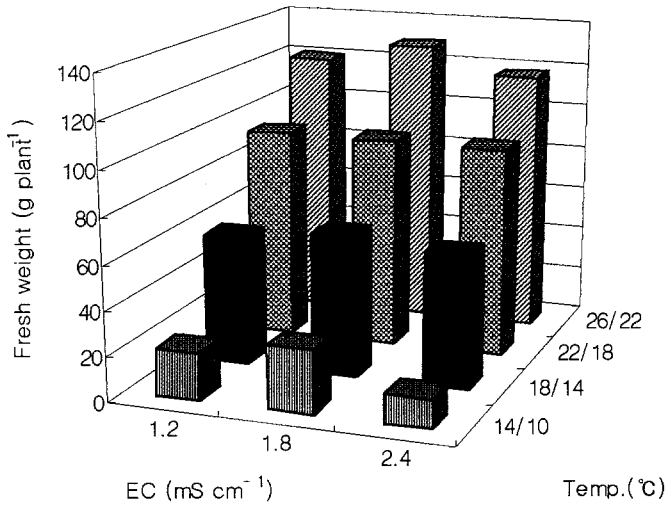


Fig 3-51. Effect of temperature and nutrient levels on the fresh weight of reddish leaf lettuce "Ttuksom" in the plant factory.

Table 3-74. Effect of temperature on transpiration rate, CO₂ assimilation rate and stomatal resistance of reddish leaf lettuce "Ttuksom" on the 16th day from treatment in the plant factory.

Temp. day/night(°C)	Transpiration rate ($\mu\text{g cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$)	CO ₂ assimilation rate ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$)	Stomatal resistance (s cm^{-1})
14/10	6.32b ^z	6.56b	1.79a
18/14	6.86b	9.22a	1.24b
22/18	10.74a	9.99a	0.85bc
26/22	11.19a	10.16a	0.65c

^z Duncan's multiple range test, significant at the 5%.

Table 3-75. Effect of temperature and light intensity on transpiration rate, CO₂ assimilation rate and stomatal resistance of reddish leaf lettuce "Ttuksom" in the plant factory.

Temp. day/night (°C)	PPFD ($\mu\text{molcm}^{-2}\text{ s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\mu\text{g cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$)	CO ₂ assimilation rate ($\mu\text{mol cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$)	Stomatal resistance (s cm^{-1})
14/10	150	6.32	6.93	2.21
	250	6.32	6.19	1.36
18/14	150	6.87	8.63	1.11
	250	6.84	9.80	1.37
22/18	150	9.48	10.67	0.93
	250	11.99	9.31	0.76
26/22	150	10.60	10.21	0.47
	250	11.79	10.11	0.84
Significance				
Temperature		**	**	**
PPFD		NS	NS	NS
Temp. × PPFD		**	**	**

^{NS,*,**} Nonsignificant or significant at $P < 0.05$ or 0.01 , respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

Table 3-76. Effect of temperature and nutrient levels on transpiration rate, CO₂ assimilation rate and stomatal resistance of reddish leaf lettuce "Ttuksom" in the plant factory.

Temp. day/night (°C)	EC (mS cm ⁻¹)	Transpiration rate (μg cm ⁻² s ⁻¹)	CO ₂ assimilation rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Stomatal resistance (s cm ⁻¹)
14/10	1.2	6.06	5.98	2.01
	1.8	6.82	6.93	1.75
	2.4	6.08	6.78	1.60
18/14	1.2	6.98	9.90	1.01
	1.8	6.57	9.26	1.45
	2.4	7.02	8.50	1.27
22/18	1.2	9.92	10.56	1.02
	1.8	11.38	10.60	0.77
	2.4	10.91	8.81	0.75
26/22	1.2	11.43	9.12	0.77
	1.8	11.15	11.01	0.58
	2.4	11.00	10.37	0.62
Significance				
Temperature.		**	**	**
EC		NS	NS	NS
Temp. × EC		**	**	**

NS, **, Nonsignificant or significant at P < 0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P < 0.05).

다. 상대습도에 따른 배양액 관리(Relative humidity (RH))

There were little difference in fresh weight and dry weight of the lettuce under the low RH of 40±5% compared to that under the high RH of 80±5%. The best result of plant growth expressed as leaf length and fresh and dry

leaf weights were obtained under RH $80 \pm 5\%$ (Table 13). But a little tipburn occurred at RH $80 \pm 5\%$.

According to Stratton et al. (1993), the tipburn in lettuce was caused by calcium deficiency in young inner leaves. He also showed that tipburn developed rapidly under conditions that promote rapid growth. Palzkill et al. (1980) reported that elevated humidity levels tended to encourage tipburn development in cabbage after heading had been initiated. They also had larger leaves and greater fresh and dry weights at 82% than 52% RH. These response might be due, in part, to localized calcium deficiencies. It was not clear, however, to what extent fruit size and yield were affected by limited supply of assimilates from the reduced leaf area, or by the capacity of fruits to act as sinks for assimilates.

Shimizu et al. (1996) demonstrated reduced dry weight and increased transpiration rate by lowering RH to 37% in tomato and eggplant.

The highest rates of transpiration and CO₂ assimilation were observed in lettuce under RH $60 \pm 5\%$ as shown in Table 3-78.

In this experiment, considering all the facts mentioned above, RH of 60~80% was thought to be optimal for the growth of leaf lettuce in the plant factory.

Table 3-77. Effect of relative humidity on the growth of coslettuce "Manavert" in the plant factory.

RH(%)	Leaf number	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)	
				Leaf	Root	Leaf	Root
40 ± 5	25.3c ^z	21.83a	11.1a	88.85a	16.04a	5.04a	1.15a
60 ± 5	34.3a	19.50a	9.33b	102.14a	16.99a	6.01a	1.33a
80 ± 5	31.7b	25.77a	9.07b	122.91a	14.69a	6.27a	1.13a

^z Duncan's multiple range test, significant at the 5% level.

Table 3-78. Effect of nutrient levels on transpiration rate, CO₂ assimilation rate and stomatal resistance of cos lettuce "Manavert" on the 16th day from treatment in the plant factory.

RH (%)	Transpiration rate ($\mu\text{g cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$)	CO ₂ assimilation rate ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Stomatal resistance (s cm^{-1})
40 ± 5	5.91b ^z	7.07b	0.28
60 ± 5	9.82a	9.29a	0.56
80 ± 5	6.78b	6.10b	0.46

Measuring conditions: 27~29.5°C leaf temp.,
150~200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PPFD,
450~500 mg L^{-1} CO₂ concentration

^z Duncan's multiple range test, significant at the 5% level.

라. CO₂환경 및 광환경과의 복합환경 요인에 따른 배양액 관리 (Carbon dioxide (CO₂))

Fresh weight and dry weight at the CO₂ level of 2000 mg L^{-1} were almost double compared to at those in the CO₂ of 400 mg L^{-1} . Little growth differences were found among the CO₂ concentrations 1000, 2000 and 3000 mg L^{-1} (Table 3-79).

It was previously known by a number of studies that the lettuce grown under CO₂ enrichment significantly increased growth rate compare to that under ambient CO₂ (Mortensen, 1994; Peet et al., 1982; Shimizu et al., 1996).

Meanwhile Krizek et al. (1974) showed that lettuce ("Grand Rapids") grown at CO₂ level of 2000 mg L^{-1} had greater leaf area than controls but did not have greater dry weight under identical light and temperature conditions. A similar result was observed on this experiment as shown in Table 3-80. The lettuce grown at CO₂ concentrations of 2000 mg L^{-1} and 3000 mg L^{-1} did not show significant difference in plant growth.

Table 3-79. Effect of CO₂ concentration on the growth of leaf lettuce "Grand rapids" in the plant factory.

CO ₂ conc. (mg L ⁻¹)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf wt. (g plant ⁻¹)		Leaf dry wt. Ratio(%)	Root fresh wt. (g plant ⁻¹)	Relative content of chlorophyll
				Fresh	Dry			
400	11.1	14.6b ^z	13.6b	28.45b	1.81b	6.36	8.84	14.8b
1000	14.0	19.0a	16.1a	43.04a	2.52ab	5.85	8.78	17.7a
2000	13.5	18.6a	16.0a	48.13a	2.83a	5.88	9.47	18.9a
3000	13.5	16.8ab	17.5a	42.19a	2.68a	6.35	9.28	17.4a

^z Duncan's multiple range test, significant at the 5% level.

Table 3-80. Effect of CO₂ concentration and light intensity on the growth of leaf lettuce "Grand rapids" in the plant factory.

CO ₂ conc. (mg L ⁻¹)	PPFD (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf wt. (g plant ⁻¹)		Root wt. (g plant ⁻¹)		Dry wt. ratio(%)		Relative content of chlorophyll
				Fresh	Dry	Fresh	Dry	Leaf	Root	
400	100	18.3	13.0	15.64	0.83	3.77	0.37	5.31	9.81	13.4
	150	15.9	15.4	30.44	1.73	7.87	0.52	5.68	6.60	16.6
	200	15.0	13.1	31.35	1.76	7.69	0.53	5.61	6.89	19.3
	300	11.7	12.3	30.56	2.25	9.88	0.71	7.36	7.18	34.0
1000	100	23.0	14.5	31.14	1.29	4.33	0.38	4.14	8.77	14.0
	150	22.5	17.5	49.17	2.43	8.49	0.60	4.94	7.06	20.2
	200	20.7	18.9	57.89	2.94	10.72	0.61	5.08	5.69	22.1
	300	15.2	16.5	59.80	4.15	12.26	0.85	6.93	6.93	25.9
2000	100	22.4	14.0	28.36	1.31	4.97	0.38	4.62	7.64	12.5
	150	19.8	15.4	36.63	2.04	5.92	0.46	5.57	7.77	14.5
	200	19.2	16.9	53.41	2.55	9.13	0.64	4.77	7.00	21.2
	300	13.3	14.6	51.69	3.52	10.0	0.69	6.80	6.90	25.4
3000	100	18.1	13.7	24.55	1.31	4.39	0.36	5.34	8.20	12.0
	150	15.6	17.9	46.89	2.55	9.68	0.62	5.44	6.40	15.4
	200	16.5	19.6	58.63	3.71	12.84	0.80	6.33	6.23	20.2
	300	12.2	15.1	42.93	3.47	9.63	0.85	8.08	8.82	24.3

Significance

CO ₂	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
PPFD	NS	NS	*	**	**	**	**	**	**	**
CO ₂ × PPFD	NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS

^{NS,*,**} Nonsignificant or significant at P < 0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P < 0.05).

Table 3-81. Effect of CO₂ concentration and nutrient level on the growth of leaf lettuce "Grand rapids" in the plant factory.

CO ₂ conc. (mg L ⁻¹)	EC (mS cm ⁻¹)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf wt. (g plant ⁻¹)		Root wt. (g plant ⁻¹)		Dry wt. ratio(%)		Relative content of chlorophyll
					Fresh	Dry	Fresh	Dry	Leaf	Root	
400	1.2	10	15.2	14.2	29.86	1.84	8.34	0.51	5.92	6.84	19.8
	1.8	11	15.3	15.7	31.04	1.35	7.46	0.55	4.52	6.59	15.2
	2.4	11	13.1	12.4	27.13	1.99	9.13	0.61	7.33	6.68	15.3
	4.8	13	14.9	12.1	25.79	2.06	10.4	0.80	7.97	7.65	19.3
1000	1.2	17	19.8	14.5	38.27	1.89	6.14	0.58	4.94	9.41	10.3
	1.8	14	21.0	17.0	47.71	2.70	6.65	0.41	5.66	6.17	22.0
	2.4	11	22.5	16.4	45.77	3.13	9.36	0.59	6.84	6.30	12.4
	4.8	14	22.5	16.4	40.39	2.32	8.93	0.61	5.74	6.83	14.6
2000	1.2	15	17.5	14.0	46.91	2.51	9.54	0.58	5.35	6.07	15.2
	1.8	10	17.9	16.3	45.21	2.13	7.49	0.50	6.19	6.68	21.5
	2.4	13	20.9	16.5	59.73	3.71	9.49	0.58	6.21	5.10	16.3
	4.8	12	18.2	17.2	40.68	2.96	11.3	0.65	7.28	5.72	17.6
3000	1.2	18	15.5	19.0	45.47	2.69	11.0	0.69	5.92	6.26	16.6
	1.8	14	17.2	17.5	40.39	2.46	7.93	0.55	6.09	6.94	18.0
	2.4	11	17.7	16.4	40.44	2.62	7.83	0.60	6.48	7.66	21.1
	4.8	11	16.9	16.9	42.44	2.95	10.3	0.76	6.95	7.36	20.0
Significance											
CO ₂		NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS
EC		NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	**	NS	NS
CO ₂ × EC		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS,** Nonsignificant or significant at P < 0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P < 0.05).

The effects of both CO₂ concentration and light intensity on the plant

growth were significant. Their effects on the plant growth were not correlative except leaf dry weight. When CO₂ concentration in the plant factory was raised up to 2000 mg L⁻¹, the growth of leaf lettuce was not significantly different between light intensity 200 μmol m⁻²s⁻¹ and 300 μmol m⁻²s⁻¹ (Table 3-80).

The interaction between CO₂ concentration and nutrient level did not affect to the growth of lettuce (Table 3-81). Leaf lettuce grown under different nutrient levels and same CO₂ concentration did not show significant differences in plant growth. Meanwhile, the growth of leaf lettuce under low nutrient level (EC 1.2 mS cm⁻¹) was not inferior to high levels (EC 2.4 and 4.8 mS cm⁻¹) when CO₂ concentration was maintained high.

Generally, the photosynthetic rates were also influenced by CO₂ concentration. The increase in net photosynthesis with elevated CO₂ concentration was caused by rapid diffusion of CO₂ molecules resulting in an accelerated rate of carboxylation by RuBISCO and also a reduction in photorespiration (Hall and Keys 1983). Increased CO₂ assimilation under elevated CO₂ concentrations also resulted in an increase in quantum efficiency (moles of CO₂ reduced per mole of photons absorbed) with lower irradiance levels being required to reach the light compensation point and higher irradiance levels being needed to saturate photosynthesis. Higher CO₂ assimilation rate and lower stomatal resistance were observed as both CO₂ concentration and PPFD levels increased (Table 3-82). Higher CO₂ concentration environments increased photosynthetic rates (Jones et al., 1984; Valle et al., 1985; Wong, 1980) with a concomitant increase in dry matter production (Allen, 1979; Kimball, 1983; Rogers et al., 1983). In many cases high CO₂ concentrations decreased transpiration through increase in stomatal resistance (Farquhar and Sharkey, 1982; Goudriaan and van Larr, 1978; Rosers et al., 1984).

A similar result was obtained from this experimen. The plant grown at

CO₂ concentration of 400 mg L⁻¹ showed the highest transpiration rate and the lowest stomatal resistance but those grown at CO₂ concentration over 1000 mg L⁻¹ showed decreased transpiration rate and increased stomatal resistance (Table 3-84). Increases in water use efficiency (WUE=photosynthesis/transpiration) should result regardless of whether high CO₂ concentrations caused negligible increases in photosynthetic rates coupled with large reductions in transpiration rates or not.

Table 3-82. Effect of CO₂ concentration on transpiration rate, CO₂ assimilation rate and stomatal resistance of leaf lettuce "Grand rapids" on the 16th day from treatment in the plant factory.

CO ₂ concentration (mg L ⁻¹)	Transpiration rate (μg cm ⁻² s ⁻¹)	CO ₂ assimilation rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Stomatal resistance (s cm ⁻¹)
400	4.74a	4.27c	0.44b
1000	3.13b	5.93b	0.50b
2000	2.71b ^z	6.24ab	0.88a
3000	3.73ab	7.38a	0.82a

^z Duncan's multiple range test, significant at the 5% level.

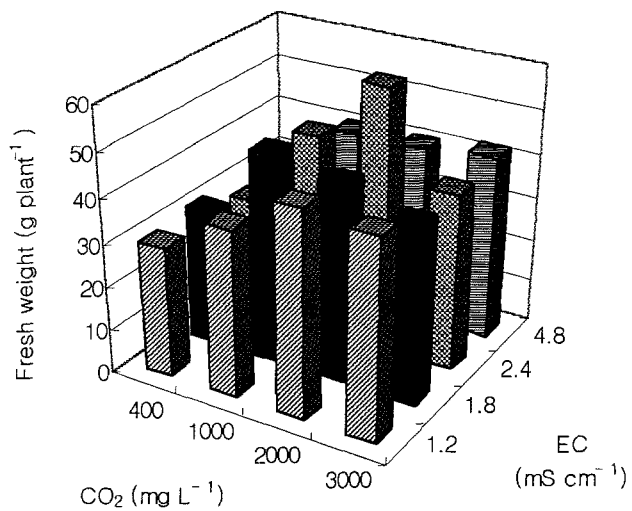


Fig 3-52. Effect of CO₂ concentration and nutrient levels on the fresh weight of leaf lettuce "Grand rapids" in the plant factory.

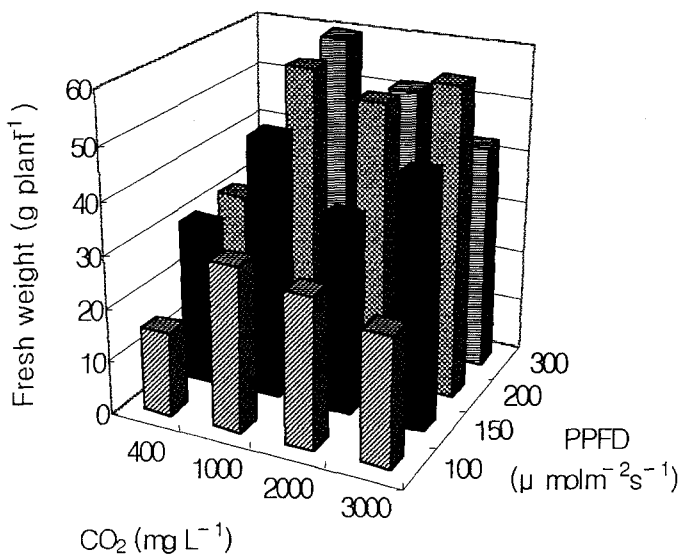


Fig 3-53. Effect of CO₂ concentration and light intensity on the fresh weight of leaf lettuce "Grand rapids" in the plant factory.

Table 3-83. Effect of CO₂ concentration and nutrient level on transpiration rate, CO₂ assimilation rate and stomatal resistance of leaf lettuce "Grand rapids" on the 16th day from treatment in the plant factory

CO ₂ conc. (mg L ⁻¹)	EC (mS cm ⁻¹)	Transpiration rate (μg cm ⁻² s ⁻¹)	CO ₂ assimilation rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)	Stomatal resistance (s cm ⁻¹)
400	1.2	4.66	2.51	0.32
	1.8	6.18	3.73	0.40
	2.4	4.32	5.17	1.48
	4.8	3.77	5.68	0.56
1000	1.2	3.17	6.34	0.55
	1.8	2.96	5.62	0.53
	2.4	3.22	5.34	0.47
	4.8	3.15	6.40	0.44
2000	1.2	2.02	6.42	1.27
	1.8	3.55	7.14	0.80
	2.4	2.95	5.98	0.59
	4.8	2.31	5.43	0.88
3000	1.2	4.28	6.87	0.75
	1.8	4.07	8.06	0.88
	2.4	3.46	7.78	0.81
	4.8	3.13	6.83	0.85
Significance				
CO ₂		**	**	**
EC		NS	NS	NS
CO ₂ × EC		NS	NS	NS

NS,*,** Nonsignificant or significant at P < 0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P < 0.05).

Table 3-84. Effect of CO₂ concentration and light intensity on transpiration rate, CO₂ assimilation rate and stomatal resistance of leaf lettuce "Grand rapids" on the 16th day from treatment in the plant factory.

CO ₂ conc. (mg L ⁻¹)	PPFD (μ mol m ⁻² s ⁻¹)	Transpiration rate (μ g cm ⁻² s ⁻¹)	CO ₂ assimilation rate (μ mol m ⁻² s ⁻¹)	Stomatal resistance (s cm ⁻¹)
400	100	2.66	4.04	1.04
	150	2.58	5.17	0.98
	200	4.02	5.03	0.79
	300	5.33	6.89	1.45
1000	100	2.44	6.55	3.76
	150	2.93	7.52	1.39
	200	2.77	7.70	0.59
	300	2.58	8.13	0.68
2000	100	2.76	8.53	0.38
	150	3.33	8.33	1.06
	200	3.33	10.15	0.62
	300	3.45	9.61	0.44
3000	100	2.73	5.99	0.92
	150	2.76	6.92	1.37
	200	3.77	9.32	0.20
	300	4.10	9.05	0.40
Significance				
CO ₂		NS	**	NS
PPFD		**	NS	NS
CO ₂ × PPFD		NS	NS	NS

NS,*,** Nonsignificant or significant at P < 0.05 or 0.01, respectively.

The values followed by the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P < 0.05).

From the result, it could be concluded that leaf lettuce in the plant factory showed better growth with CO₂ enrichment. However CO₂ concentrations over 2000 mg L⁻¹ gave little effect on the growth.

마. 근권내 영양 조건에 따른 상추의 생체반응 및 배양액 관리

- N 수준

질소수준을 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 ppm으로 조절하여 생체반응을 측정 하였던 결과 광합성과 증산량은 N 50 ppm이상에서 높아지기 시작하여 200ppm 이상에서는 낮아졌다.

한편, 확산저항은 N 50 ppm-200ppm 까지에서 낮아졌으며 특히 N 150~200ppm 수준에서 가장 낮다.

- P 수준

인 수준은 0, 10, 20, 40, 80, 160 ppm으로 조절하여 생체반응을 측정한 결과 P 80ppm~120ppm수준에서 광합성과 증산량이 높았으며, 확산저항과 기공저항은 가장 낮게 나타났다. 이들 범위를 벗어나 낮아지거나 높아지면 확산저항은 급격히 높아지는 경향을 보였다. 상추생육도 같은 경향을 보였다.

- K 수준

칼슘수준은 0, 10, 50, 100, 150, 300 ppm으로 조절하였다. 증산량과 광합성은 100ppm 까지 급격히 증가한 후 그 이상의 K 수준에서 일정한 경향을 나타냈다. 확산저항은 50ppm이하에서 급격히 높아지기 시작하였으며, 100ppm-150ppm에서 낮게 유지하였다.

- Ca 수준

칼슘수준은 0, 10, 50, 100, 150, 200 ppm으로 조절하였다. 증산량과 광합성은 150ppm에서 높은 결과를 보였으며 확산저항은 낮게 나타났다. 그러나 Ca 수준에 따른 확산저항의 차이는 다른 원소(N, P, K)에서와 같이 크지 않았다.

- Mg 수준

마그네슘은 0, 10, 50, 100, 150, 200 ppm으로 조절하였다. 광합성과 증산량은

10-80ppm수준에서 높았고 그 차이는 없는 것으로 나타났다. 확산저항도 Mg 농도가 50-100ppm수준에서 낮게 나타났으며 50ppm이하와 100ppm이상에서 높았다.

- 미량원소

Fe은 0.5ppm에서 12ppm수준에서 광합성, 증산량의 차이는 없었고, 확산저항은 0.5ppm이하에서 높게 나타났다.

B은 0.25ppm 이상에서 광합성과 증산량이 높았으며, 확산저항은 0.25-2ppm 수준에서 낮았으며 그 이상과 이하에서 높아지는 경향을 나타냈다.

이상의 근권내 주요 무기원소 수준에 따른 상추 생체반응을 조사한 결과를 중심으로 배양액 관리모델을 확립하고자 한다.

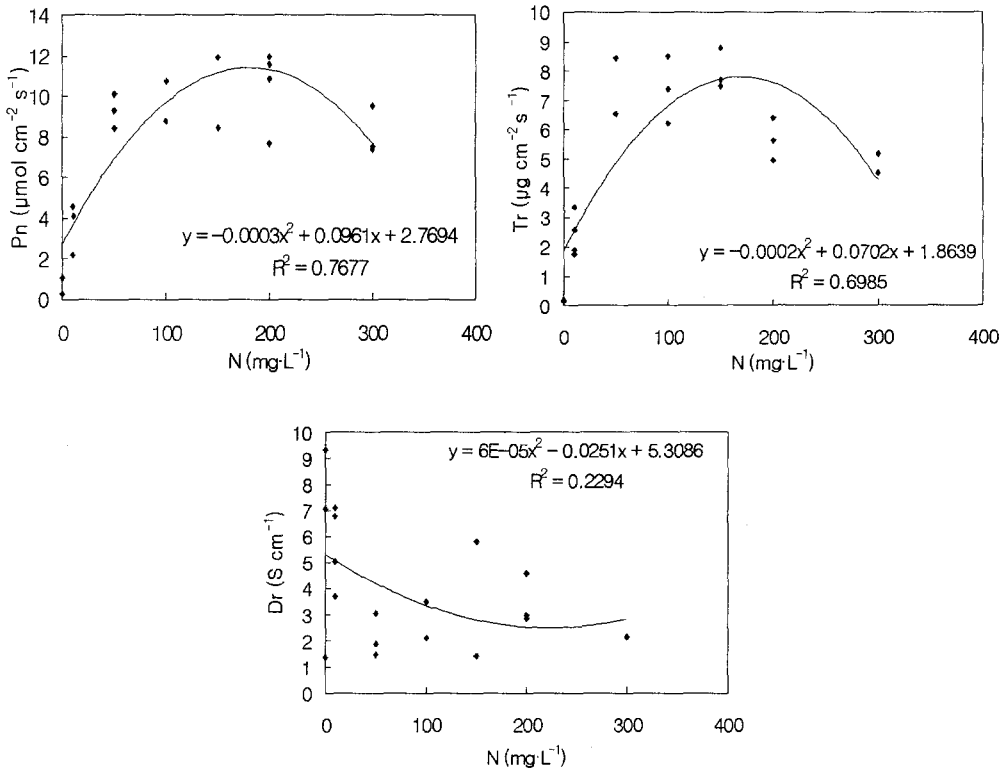


Fig. 3-54. Effect of nitrogen content on photosynthesis (Pn), transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (Dr) of the expanded leaves of butterhead 'Omega' at 25days after treatment.

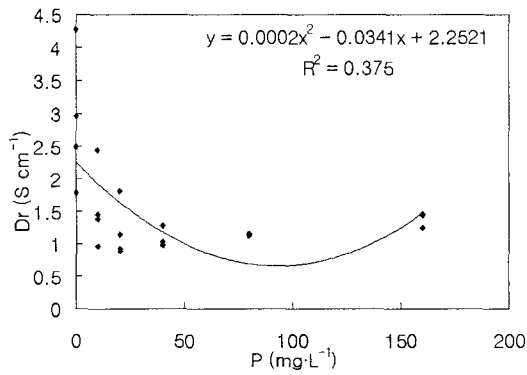
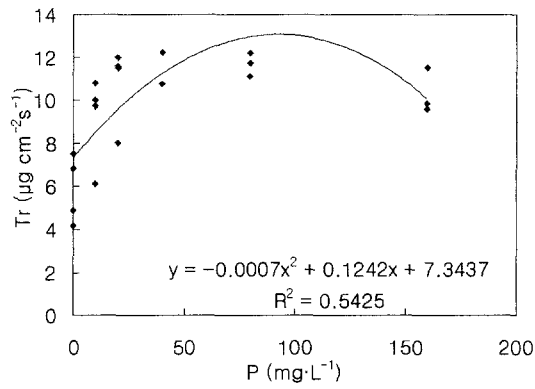
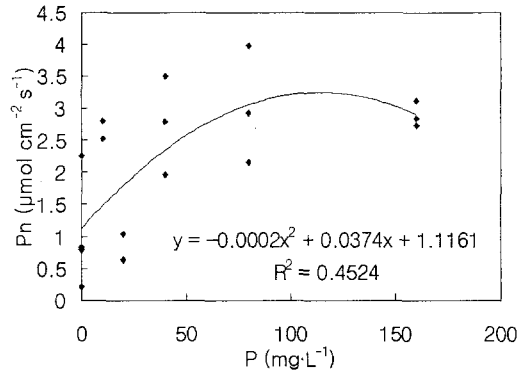


Fig. 3-55. Effect of phosphorus content on photosynthesis (Pn), transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (Dr) of the expanded leaves of butterhead 'Omega' at 25days after treatment.

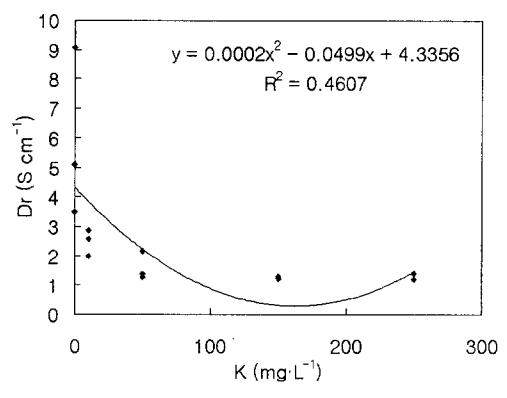
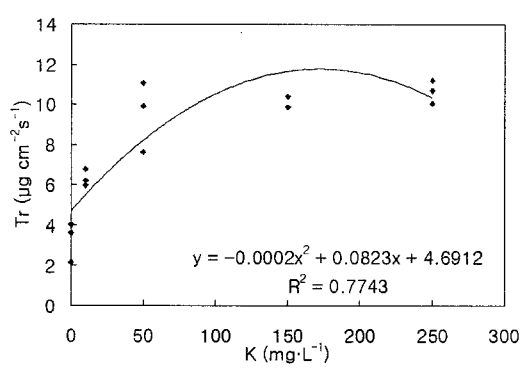
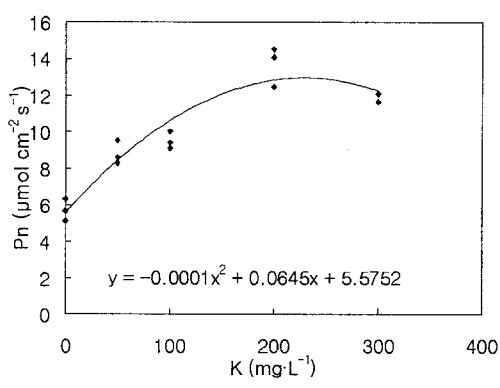


Fig. 3-56. Effect of potassium content on photosynthesis (Pn), transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (Dr) of the expanded leaves of butterhead 'Omega' at 25days after treatment.

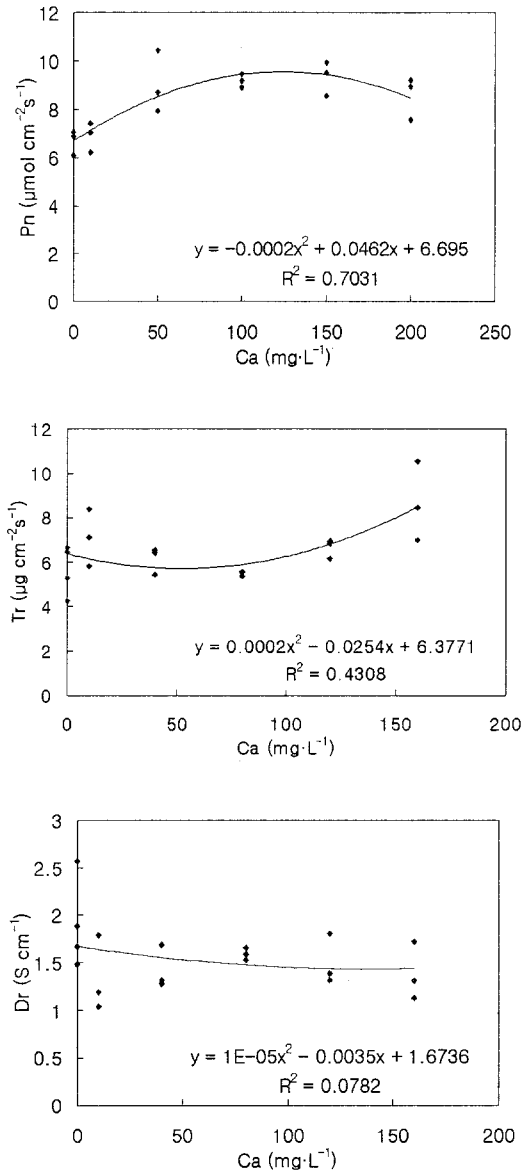


Fig. 3-57. Effect of calcium content on photosynthesis (Pn), transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (Dr) of the expanded leaves of butterhead 'Omega' at 25days after treatment.

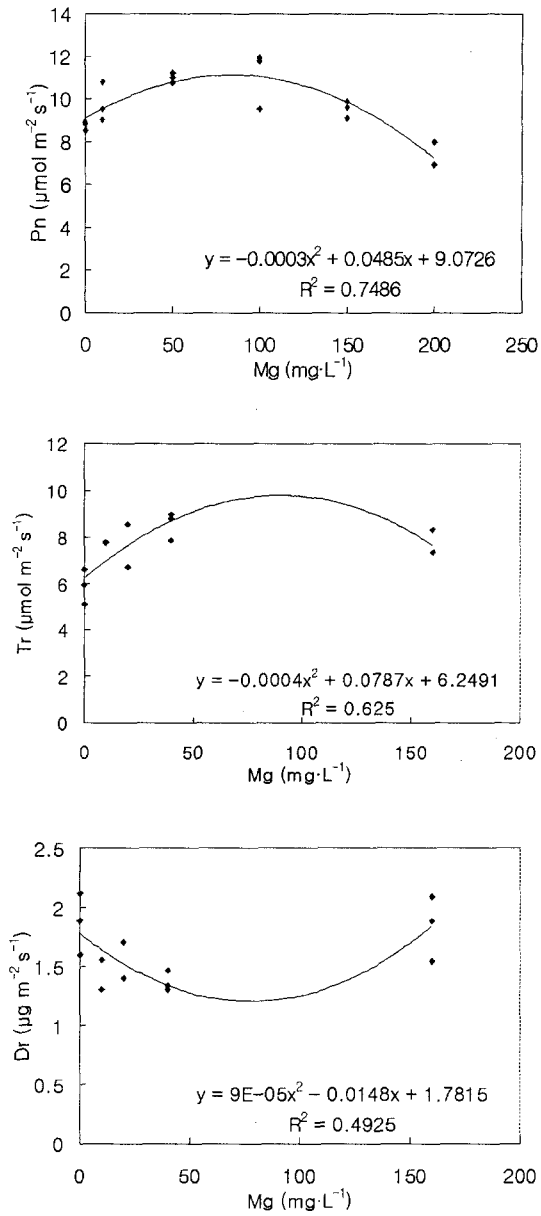


Fig. 3-58. Effect of magnesium content on photosynthesis (Pn), transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (Dr) of the expanded leaves of butterhead 'Omega' at 25days after treatment.

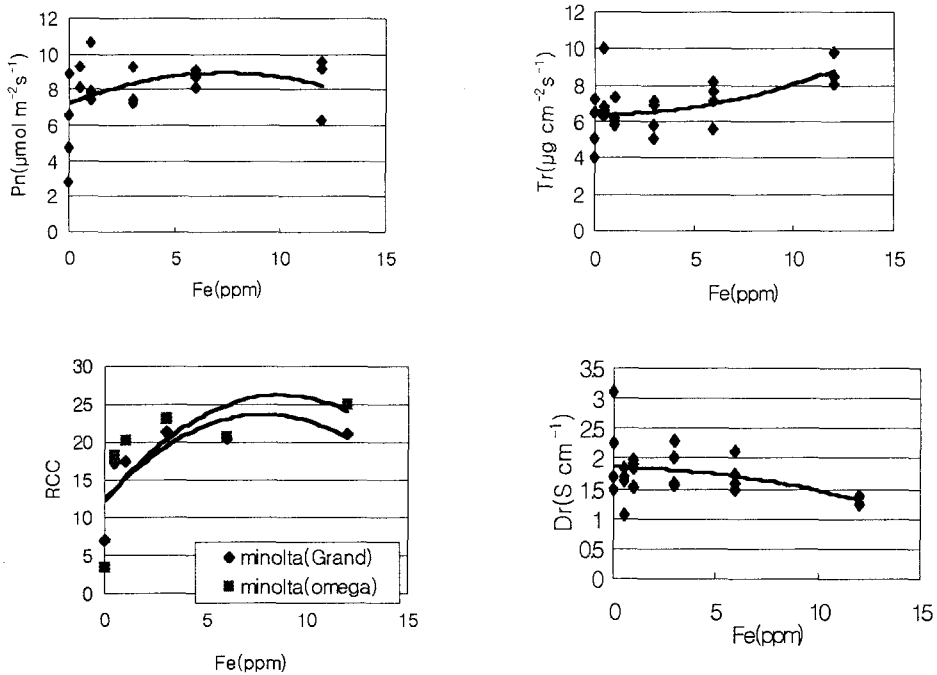


Fig 3-59. Effect of iron content on transpiration rate(Tr), diffusive resistance(DR), photosynthesis(Pn) and relative chlorophyll content in expanded leaves of butterhead 'Omega' at 25days after treatment.

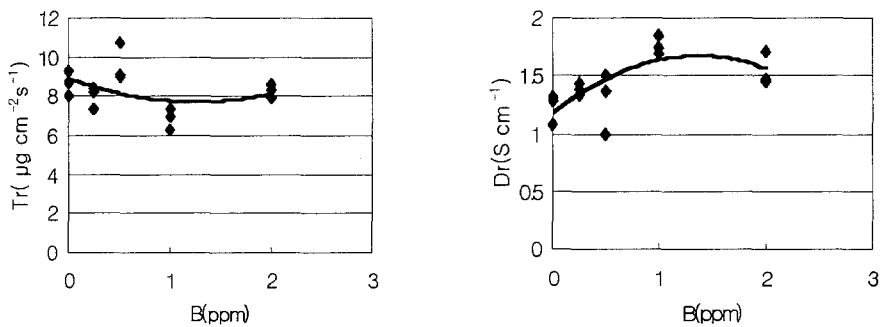


Fig 3-60. Effect of boron content on transpiration rate(Tr) and diffusive resistance(DR) in expanded leaves of butterhead 'Omega' at 25days after treatment.

정리하면, 근권내 다량원소 농도가 증가할수록 점차 증가하여 광합성과 증산율이 최고가 되고 그 후 감소하는 포물선을 그렸다. 각 원소들마다 적정 농도에서 광합성과 증산이 최대가 되고, 적정 농도 이상이 되면 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 이들 기초 자료를 바탕으로 생체계측에 의한 근권내 무기 영양제어가 가능할 것으로 판단되었다.

바. 생육단계에 따른 최적 배양액 조건 구명

1) 생육시기에 따른 상추의 양수분 흡수특성

Table 3-85는 실험에 공시한 양액의 조성율을 나타낸 것으로 Yamazaki 처방액은 1배액에서 EC가 낮으며, 일본원시 처방액은 질소와 K^+ , Ca^{2+} 이 높은 편이다. 양액 농도가 높아지면 뿌리에서 원활한 흡수가 이루어지지 못하므로 일본원시 처방액의 0.5배와 0.25배액으로 재배하였다.

Table 3-85. Nutrient composition of each nutrient solutions used for lettuce culture.

Treatment ^z	NO ₃ -N	PO ₄ -P	K ⁺ me/L	Ca ²⁺	Ca ²⁺
Yamazaki	6	1.5	4	2	1
JH 1/2S	8	2	4	4	2
JH 1/4S	4	1	2	2	1

^z JH : nutrient soln. of Horticultural Experiment Station in Japan.

pH에 있어서 따로 보정은 하지 않았기 때문에 생육기간에 따라 변동폭이 컸으며, 특히 EC가 낮은 일본원시 처방 0.25배액에서는 정식 후 5일째까지 pH 1 정도 감소하다 다시 증가하는 경향을 나타냈다.

정식 후 10일째 양액을 갱신하였을 경우 pH가 약간 증가하다 다시 감소하지만 7~8일 경과하면 다시 증가하는 경향을 보였고, 생육후기에 갱신하였을 경우에는

일본원시 처방0.5배액을 제외한 두 처리구에서 계속 증가하는 경향을 보였다.

EC에 있어서는 생육초기에 약간 증가하다 다시 감소하였으며 10일째 양액 갱신 후 초기에 급격히 증가하다 서서히 감소하여 생육이 왕성한 20일 이후에는 꾸준히 감소하는 경향을 보였다.

Table 3-86는 수확시 상추의 생육을 비교한 것이다.

전반적으로 Yamazaki 처방액과 일본원시 처방 0.5배액에서 원활한 생육을 보였고, 0.25배액에서 가장 낮은 생육을 나타냈다. 엽수는 Yamazaki 처방액에서 많았으나 엽장은 오히려 감소하는 경향을 보였으며, 생체중과 건물중은 유의적으로 높게 나타났다. 일본원시 처방액에서는 0.25배액보다 0.5배액에서 생육이 원활하게 이루어졌는데, 각각의 양액의 EC는 0.5배액에서 1.3dS/m이고, 0.25배액에서 0.73dS/m로 뿌리에서 충분한 양분흡수를 위해서는 0.25배액보다 높아야 양호할 것으로 보인다.

Table 3-86. The growth characteristics of lettuce following by culturing in different nutrient solution at harvest.

Nutrient solution	No. of leaves	Leaf length(cm)	Leaf width(cm)	Fresh weight(g)		Dry weight(g)	
				Leaf	Root	Leaf	Root
Tamazaki	26.63a ^z	22.94b	14.65s	88.61a	15.49a	4.87a	1.06a
JH 1/2S	24.25ab	25.04s	14.33a	77.94a	13.02b	4.70a	0.99ab
JH 1/4S	23.50b	21.98b	12.20b	56.59b	11.86b	3.55b	0.89b

^zDuncan's multiple range test (P<0.05)

Table 3-87은 각 양액에서 매일 무기양분의 흡수량을 나타낸 것으로써 한 개체의 평균 총건물중에 무기물함량을 곱하여 생육기간으로 나눈 것이다. 대부분의 무기물 축적량은 생육초기에 가장 적고 다음이 생육후기이며, 생육중기에서 가장 많은 축적을 보였다. 전질소에 있어서 생육일수가 증가할수록 함량이 증가하고 있는데, 10일째보다는 20일째에서 1.85~4.7배 정도 증가하였고 25일째에서는 2.16~3.38배 증가하였다.

특히 Ca^{2+} 과 Mg^{2+} 의 경우 그 변화폭이 가장 크게 나타나 생육초기와 생육중기의 증가율은 각각 7.56~15.31배였다. 생육초기에는 일본원시 처방액 1/2배 농도에서 많은 축적률을 보이고 1/4배 농도에서 가장 낮았다. 생육중기에는 대체로 Yamazaki 처방액에서 높은 축적량을 나타냈고, 생육 후기에는 이온별로 약간 다른 축적률을 보이지만 일본원시처방 0.25배액 처리에서 가장 낮은 축적률을 나타냈다. 이는 삼투압의 영향을 받아 양액의 농도가 높을수록 그 축적률도 증가하는 것으로 생각된다.

Table 3-87 The average daily uptake amount of minerals of lettuce hydroponically cultured in different nutrient solution.

Growth period (days) ^Z	Treatment	T-N	NO_3^-	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
		(mg/plant/day ^Y DW)				
10	Yamazaki	2.164	4.387	2.642	0.310	0.091
	JH 1/2S	2.270	5.547	2.864	0.315	0.104
	JH 1/4S	1.742	3.506	1.604	0.206	0.054
20	Yamazaki	8.165	10.023	15.392	1.558	0.595
	JH 1/2S	7.811	7.962	11.231	1.442	0.599
	JH 1/4S	5.013	3.939	10.964	1.283	0.827
25	Yamazaki	5.884	9.790	11.917	1.453	0.573
	JH 1/2S	6.672	7.637	14.487	0.786	0.653
	JH 1/4S	4.912	6.158	8.576	0.491	0.224

^ZDay after transplanting

^Y $(C_s - C_{ps}) \div D$, where C_s , C_{ps} =total content of plant at sample date, previous sampling date, respectively, and D =growing days.

Table 3-88은 각 생육단계별로 Yamazaki formula로부터 계산한 n/w값을 나타낸 것이다.

각 이온별로 생육단계에 따라 상이한 값을 보였는데, Yamazaki 양액의 경우 질산태질소나 인산태인 등은 Table 3-87에서 보여지듯이 생육초기에 약간 낮은 값

을 나타내다가 생육중기에 높아져 후기에 약간 감소하는 경향을 보였지만 일본원 시처방액에서는 생육중기에 2배가량 증가하다 생육후기에는 증가폭이 약간 둔감하는 경향이였다. 반면에 암모니아태질소나 칼슘 등에서는 생육초기보다 생육중기에 더 낮아지고 생육후기에 다시 증가한 경향을 보였고, K⁺ 및 Mg²⁺은 생육일수에 따라 약간씩 증가하는 경향을 보였다.

Table 3-88. The average daily uptake amount of minerals of lettuce hydroponically cultured in different nutrient solution.

Growth period (days)	Nutrient solution	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		(me/L)					
10	Yamazaki	6.16	4.64	1.12	10.01	3.20	0.92
	JH 1/2S	6.74	5.03	1.40	8.99	11.13	0.89
	JH 1/4S	5.09	2.68	1.41	6.42	3.46	0.18
20	Yamazaki	12.60	2.25	3.39	10.13	2.50	0.60
	JH 1/2S	10.09	3.10	3.09	8.94	5.25	1.02
	JH 1/4S	9.72	1.60	2.51	6.76	2.85	0.63
25	Yamazaki	11.79	3.03	2.65	10.54	2.46	0.56
	JH 1/2S	11.92	3.86	2.69	9.57	6.84	1.62
	JH 1/4S	10.12	1.98	2.28	7.38	3.19	0.85

^zDay after transplanting

^y(C_s-C_{ps})÷D, where C_s, C_{ps}=total content of plant at sample date, previous sampling date, respectively, and D=growing days.

2) 생육시기에 따른 미나리 양수분 흡수특성

Table 3-89에 양액 조성을 나타내었다.

미나리 전용양액(Ahn)은 일본원시처방 1/2배액보다 질산태질소와 칼슘의 양이 2me/L 적고 인산은 1me/L 높은 편이다.

Table 3-89. Nutrient composition of each nutrient solutions used for water dropwort culture.

Treatment ^c	NO ₃ -N	PO ₄ -P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	(me/L)				
Ahn	6	3	4	2	1
JH 1/2S	8	2	4	4	2
JH 1/4S	4	1	2	2	1

^ZAhn ; exclusively developed nutrient solution for water dropwort culture, JH ; nutrient soln. of Horticultural Experiment Station in Japan

각 양액조성에서 미나리를 재배하였을 경우 pH와 EC의 변화는 다양하게 나타났는데, pH의 경우 일본원시 처방액에서는 정식 2~3일째 증가하다 약간 감소하고 그 이후 다시 증가하는 경향을 보이는데 농도가 높을수록 감소보다는 증가하였다. 반면 미나리 전용양액에서는 꾸준히 감소하는 경향을 보였다. 그리고 생육 중기에는 초기와 비교해 이러한 경향이 심화되었으며, 생육후기에는 모든 양액처리에서 꾸준히 감소하였다. 단지 일본원시 처방액 1/4배 농도에서는 생육말기에 pH가 약간 증가하는 추세를 보였다.

EC의 변화에 있어서는 대체로 생육일수에 따라 약간씩 감소하는 경향을 보였으며 특히 생육 중기이후에는 농도가 낮은 일본 원시처방 1/4배액에서 급격한 감소를 보여 뿌리에서 이온 흡수가 왕성하게 일어나는 것으로 생각된다.

각 양액에서 수확시 생육(Table 3-90)을 보면 대체로 유의적인 차이를 보이지 않았지만 초장과 생체중은 전용양액에서 약간 높게 나타났고 엽수와 근장 및 지하부 건물중은 일본원시 처방 1/2배액에서 약간 증가하였다. 그리고 일본원시 처방 1/4배액에서는 생육이 약간 부진한 결과를 보였다.

Table 3-90. The growth characteristics of water dropwort grown by different nutrient solution at harvest.

Nutrient solution	Plant height (cm)	No. of leaves	Root length (cm)	Fresh weight (g)		Dry weight (g)	
				shoot	root	shoot	root
Ahn	51.51a ^z	7.38a	25.54b	65.05a	8.87a	5.29a	0.44a
JH 1/2S	45.49a	10.51a	31.57a	55.13a	7.70a	4.25a	0.60a
JH 1/4S	51.55a	7.88a	30.98a	50.07a	7.71a	3.82a	0.34a

^zDuncan's multiple range test, $p=0.05$

Table 90은 생육단계별로 매일 축적한 무기물 함량을 나타낸 것인데, 상추에서와 비슷한 결과를 보여 전질소에서는 20일째에 3.68~6.75배 증가하였고 25일째 축적률이 약간 감소하였다. 질산태질소는 생육닐수가 증가할수록 그 축적률도 계속 증가하였는데 생육중기에 급격한 경향을 보였다. 한편 K⁺의 경우 생육초기에 평균 2.7mg/plant/day였던 것이 중기에 14.1mg/plant/day로 급격하게 증가하다 후기에 약간 감소하는 경향을 보여 생육에 따른 불균형적인 흡수양상을 보였다. Ca²⁺과 Mg²⁺은 생육중기에 가장 많이 흡수하다가 후기에 약간 감소하는 경향을 나타냈다.

생육단계별 n/w값을 보면 전반적으로 10일째에 대부분의 이온이 높은 값을 나타냈다. 질산태질소의 경우 초기의 EC가 1.17dS/m인 일본원시 처방 1/2배액에서 17.25me/L로 높았고, 1/4배액에서도 11.20으로 높았다. 20일째에도 이와 비슷한 경향을 보였으나 10일째보다 다소 높아지는 경향을 보였고, 생육후기에 다른 양액에서는 그 조성이 어느정도 유지된 반면 미나리 전용양액에서는 약간 감소하였다. 암모니아태질소와 인산태인에서는 EC가 높은 처리에서 낮았고, 오히려 낮은 일본원시 처방 1/4배액에서 가장 높은 수치를 보였다. 그리고 생육초기에 그 요구량이 높고 중기에 약간 감소하다가 후기에 다시 높아지는 경향을 보였다. K⁺의 경우에는 대부분 생육 전반에 걸쳐 5.74~8.15로 일정한 흡수양상을 띠었고, 칼슘은 미나리 전용양액을 제외한 양액처리에서 그 요구도가 특히 높은 결과를 보였다. Mg²⁺에 있어서도 생육이 양호하였던 일본원시 처방 1/2배액에서 생육중기까지 비슷한

결과를 보이다 생육후기에 왕성히 흡수하는 것으로 나타났다.

Table 3-91. The average daily uptake amount of minerals of dropwort hydroponically cultured in different nutrient solution.

Growth period ^z (days)	treatment	T-N	NO ₃ ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		(mg/plant/day ^y DW)				
10	Ahn	1.132	2.336	2.519	0.459	0.126
	JH 1/2S	1.413	2.687	2.886	0.578	0.182
	JH 1/4S	1.603	2.367	1.763	0.675	0.195
20	Ahn	7.641	5.677	15.507	2.385	0.841
	JH 1/2S	6.380	5.063	14.327	2.073	0.914
	JH 1/4S	5.894	5.482	12.560	1.629	0.816
25	Ahn	6.504	7.675	9.418	1.189	0.562
	JH 1/2S	6.747	10.471	10.884	1.423	0.620
	JH 1/4S	3.444	6.733	7.744	1.187	0.239

^z Days after transplanting.

^y $(C_s - C_{ps}) \div D$, where C_s , C_{ps} = total content of plant at sampling date, previous sampling date, respectively, and D = growing days.

Table 3-92. calculated n/w values of water dropwort based on Yamazaki fomular in different nutrient solution at each growth period.

Growth period ^z (days)	Nutrient solution	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		(me/L)					
10	Ahn	8.79	5.10	6.59	7.61	2.72	0.27
	JH 1/2S	17.22	3.04	3.64	6.95	11.2	1.01
	JH 1/4S	11.20	6.52	1.21	5.74	5.40	0.55
20	Ahn	8.23	3.64	4.6	7.61	2.64	0.61
	JH 1/2S	15.09	2.18	2.97	7.98	8.71	1.14
	JH 1/4S	12.20	4.57	1.48	6.72	4.81	1.16
25	Ahn	7.86	7.16	4.50	7.16	1.20	0.30
	JH 1/2S	16.58	7.7	3.54	7.70	9.32	5.56
	JH 1/4S	12.96	8.15	2.01	8.15	4.58	3.01

^z Days after transplanting.

사. 생육단계별 재배환경에 따른 배양액 관리

생육단계별 재배환경에 따른 엽채류의 배양액관리에 필요한 기초 자료를 얻기 위해서 수행한 시험결과 지상부 환경요인 중에서 기온의 영향이 가장 크게 나타났으며, CO₂, 광도, 상대습도 등의 자체 영향은 크게 나타났지만 배양액 관리 측면에서 상대적으로 그 영향이 적게 나타나는 경향을 보여주고 있었다.

상추 생육단계별 기온과 배양액 농도와와의 관계에서 초기 생육은 중온(22℃)와 고온(28℃)에서는 저농도의 배양액에서 높은 생육량을 나타냈으나, 저온(18℃)에서는 고농도(2.4mS/cm)에서 상대적으로 높은 생육량을 나타내는 경향을 보였다. 초기 생육은 고온에서 저농도의 배양액 조건에서 높은 생육량을 나타내었다. 상추 중기 생육에서는 저온에서 고농도, 중온과 고온에서는 저농도에서 역시 높은 생육을 나타냈으나 생육중기부터는 생육초기와는 달리 12~22℃에서 높은 생육조건을 나타내는 것으로 보였다. 즉, 상추의 생육단계별 적정온도 범위도 다르고 관리 배양액의 농도 수준도 달라야 된다는 사실을 나타냈다. 상추생육단계별 상대습도 조건과 배양액 농도 조건에 따른 상추 생육반응을 초기에 60%~80%수준의 상대습도에서 40%수준에서 보다 높은 생육량을 뚜렷하게 나타냈다. 생육중기의 상추 생육반응은 초기에 비해 그 효과는 반감되는 경향을 보이고 있으나 전체적으로 60%, 80%수준에서 높은 생육을 보여주었다. 생육단계별 습도조건에 따른 배양액의 적정 농도는 뚜렷하지는 않지만 생육 중기까지 저습도(40%)에서는 중간농도(1.8 mS/cm)에서 높은 생육을 나타냈고, 중습도(60%)와 고습도(80%)조건에서는 저농도(1.2mS/cm)의 배양액 조건에서 높은 생육량을 나타냈다. 생육단계별 광조건과 배양액 농도에 따른 작물 생육반응은 광도가 높을수록 높은 생육량을 나타냈으나 차광율 60%이상에서는 생육량 감소가 뚜렷하였다. 생육단계와 광조건에 따른 배양액의 요구 농도조건은 소규모 식물공장에서는 뚜렷하지 않았으나, 인공광병용형 식물공장에서는 차광율이 높아짐에 따라 광합성 및 증산량 감소가 뚜렷하고 확산 저항은 증가되었다.

80%까지의 저광도에서는 고농도(2.4mS/cm)조건에서 광합성 및 증산량이 높았고, 생육량도 같은 경향을 나타냈다. 그러나 95%이상의 높은 차광에서는 다시 억제되어 저농도에서 높은 생육량과 광합성을 나타냈다. 이러한 자료는 차광에 따른 실내 온도 변화가 이루어진 것이 어느 정도 영향을 미친 것으로 보였다.

식물공장내 상추의 생육단계별 CO₂농도 수준과 배양액 농도에 따른 상추 생체 반응은 CO₂사용에 따른 효과는 뚜렷하게 나타났지만 CO₂사용 수준과 배양액 적정농도 관리와는 큰 연관성이 없는 것으로 보였다.

근권환경과 생체계측 자료를 중심으로 한 배양액 관리는 배양액의 산도가 pH5.0~6.0수준에서 높은 광합성과 증산량을 나타냈으며, 확산저항도 가장 낮게 유지되는 것으로 나타났다. 배양액 농도에서는 생육초기에 1.2~1.5mS/cm에서, 생육중기 이후에는 1.2~2.0mS/cm에서 높은 광합성과 증산량을 보였고, 확산저항도 가장 낮은 수준을 보였다. 근권내 용존산소에 따른 생체반응에서는 용존산소 함량이 높을수록 광합성과 증산량은 높아졌으며, 확산저항은 낮아지는 경향을 뚜렷하게 보여 주었다. 근권온도에 따른 생체반응에서 생육초기에는 25~30℃의 높은 온도에서 광합성과 증산량이 높았고, 확산저항은 낮게 나타났으나, 생육중기 이후 부터는 근권온도가 20~25℃에서 높은 광합성과 증산량이 높았으며, 확산저항이 낮았다. 반면에 15℃이하와 30℃이상에서 높은 확산저항을 나타냈다.

이상의 식물단계별 근권환경에 따른 생체계측 자료에 따르더라도 확산저항이 낮고, 광합성과 증산량이 높은 수준에서 배양액의 적정제어 수준이 된다는 것을 알 수 있었다.

근권내 배양액내 무기이온 조성에 따른 생체반응계측에서도 시립대 개발 배양액(SCU액)의 수준에서 전반적으로 높은 광합성과 증산량을 보여 주고 있으며, 낮은 확산저항을 나타냈다. 또한 무기이온 조성의 변화가 나타나고 있어 근권배양액 내 영양상태를 예측제어 할 수 있다는 중요한 근거를 마련해 주었다.

1) 온도 환경에 따른 생육 단계별 배양액 관리

환경제어가 이루어지는 growth chamber에서 생육 초기에 주야간 온도 관리를 28/24℃로 했을 때 생체중과 건물중 모두 높은 수치를 보여 가장 생육이 좋은 것을 알 수 있었고, 이 때 배양액의 EC가 1.2 dS · m⁻¹와 1.8 dS · m⁻¹에서 가장 생육이 좋았다(Table 3-93.).

생육 중기에는 주야간 온도에 따른 현저한 차이는 없었지만 28, 24℃의 고온 관리가 다른 온도 관리보다 비교적 높은 수치를 나타냈다. 그러나 이러한 고온 조건에서 'Omega'의 결구형성은 제대로 이루어지지 않았다(Table 3-94.).

Table 3-93. Effects of air temperature and nutrient concentration on the growth of butterhead lettuce 'Omega' (early stage).

Air temp. day/light (°C)	EC (dS · m ⁻¹)	A/B	No. of leaves	Root weight (g/plant)	Fresh weight (g/plant)	S/R	Dry weight (g/plant)
16/12	1.2	1.45	10.33	1.76	4.03 d ^z	2.29	0.237 d
	1.8	1.06	10.67	1.63	4.36 d	2.68	0.243 d
	2.4	1.46	10.00	1.83	4.97 cd	2.72	0.267 d
22/18	1.2	1.45	10.33	1.60	5.48 c	3.43	0.290 c
	1.8	1.45	12.33	1.54	5.40 c	3.51	0.290 c
	2.4	1.49	11.33	1.49	4.57 b	3.07	0.273 d
28/24	1.2	1.65	13.67	1.69	7.59 a	4.49	0.433 a
	1.8	1.55	13.33	1.71	7.15 ab	4.18	0.403 ab
	2.4	1.56	13.00	1.71	6.53 b	3.82	0.367 b

^z Duncan s multiple rang test, p=0.05

A/B : leaf length / leaf width

S/R : fresh weight / root weight

Table 3-94. Effects of air temperature and nutrient concentration on the growth of butterhead lettuce 'Omega' (middle stage).

Air temp. day/light (°C)	EC (dS · m ⁻¹)	A/B	No. of leaves	Root weight (g/plant)	Fresh weight (g/plant)	S/R	Dry weight (g/plant)
16/12	1.2	1.81	23.00	5.33	29.88 b ^z	5.61	1.407 a
	1.8	1.79	24.00	6.75	34.95 a	5.18	1.427 a
	2.4	1.84	23.33	4.94	36.46 a	7.38	1.490 a
22/18	1.2	1.49	24.33	4.26	32.59 a	7.65	1.413 a
	1.8	1.21	21.67	4.10	30.06 b	7.33	1.320 b
	2.4	1.51	22.67	3.88	28.00 b	7.22	1.163 c
28/24	1.2	1.86	26.33	4.27	34.87 a	8.17	1.553 a
	1.8	1.51	25.67	4.12	34.53 a	8.38	1.445 a
	2.4	1.55	26.00	3.85	33.29 a	8.65	1.480 a

^z Duncan's multiple range test, p=0.05

A/B : leaf length / leaf width

S/R : fresh weight / root weight

증산량과 광합성을 살펴보면 생육 초기에는 주야간 온도가 16, 12°C, 22, 18°C일 때 높게 나타났고 이 때 배양액의 EC가 1.8 dS · m⁻¹일 때 높은 증산량과 광합성 수치를 보였다. 그러나 고온인 28, 24°C에서는 1.2 dS · m⁻¹에서 증산량과 광합성이 높게 나타났다(Table 3-95).

Table 3-95. Effects of air temperature and nutrient concentration on diffusive resistance, stomatal resistance, transpiration rate and photosynthesis of butterhead lettuce 'Omega' (early stage).

Air temp. day/night (°C)	EC (dS · m ⁻¹)	Photosynthesis (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	Transpiration rate (μg · cm ⁻² · s ⁻¹)	Diffusive resistance (s · cm ⁻¹)	Stomatal resistance (s · cm ⁻¹)
16/12	1.2	4.02	8.03	2.20	0.88
	1.8	5.45	13.99	1.24	0.80
	2.4	5.95	9.41	1.84	0.85
22/18	1.2	5.63	10.06	1.78	0.54
	1.8	8.70	12.81	1.36	0.75
	2.4	4.65	8.24	2.27	0.82
28/24	1.2	6.75	10.10	2.12	0.72
	1.8	4.40	5.19	4.05	0.77
	2.4	5.50	4.88	4.31	0.87

생육 중기에는 22, 18℃에서는 1.8 dS · m⁻¹일 때, 16, 12℃에서는 2.4 dS · m⁻¹일 때, 28, 24℃에서는 1.2 dS · m⁻¹에서 가장 높은 수치를 나타냈다(Table 3-96).

Table 3-96. Effects of air temperature and nutrient concentration on diffusive resistance, stomatal resistance, transpiration rate and photosynthesis of butterhead lettuce 'Omega' (middle stage).

Air temp. day/night (°C)	EC (dS · m ⁻¹)	Photosynthesis (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	Transpiration rate (μg · cm ⁻² · s ⁻¹)	Diffusive resistance (s · cm ⁻¹)	Stomatal resistance (s · cm ⁻¹)
16/12	1.2	3.81	4.40	4.04	0.57
	1.8	4.95	8.27	2.22	0.56
	2.4	6.27	11.01	1.93	0.55
22/18	1.2	5.00	6.85	2.49	1.12
	1.8	5.32	13.63	1.21	1.11
	2.4	3.06	6.56	2.82	1.32
28/22	1.2	8.25	9.60	2.11	0.68
	1.8	3.09	5.13	4.00	1.20
	2.4	1.51	5.18	3.98	0.99

환경제어가 이루어지는 growth chamber에서 온도 관리는 생육 초기에 고온관리가 유리하나, 생육 중기 이후부터는 중, 저온 관리로 충분하며, 배양액의 관리는 16℃의 저온에서는 고농도로, 22℃의 적온에서는 1.2~1.8 dS · m⁻¹로, 28℃의 고온에서는 1.2 dS · m⁻¹의 낮은 농도 관리가 바람직한 것으로 나타났다.

'Omega'의 생체중은 저온 처리(16℃)에서는 고농도(2.4 dS · m⁻¹)에서, 고온(22, 28℃)에서는 저농도(1.2 dS · m⁻¹)에서 가장 높았다.

2) 습도조건에 따른 생육단계별 배양액 관리

Table 3—97 Effect of relative humidity and EC density on early stage of lettuce 'Omega' at 7 days after treatment.

Relative humidity (%)	EC (mS/cm)	Leaf length	Leaf width	A/B	Leaf number	Root length	Root weight	Fresh weight	S/R	Dry weight
		(A) (cm)	(B) (cm)			(cm)	(g/plant) (R)	(g/plant) (S)		(g/plant)
40%	1.2	8.80	5.53	1.59	10.7	15.63	1.18	2.55 c ^z	2.16	0.127 c
	1.8	8.73	5.60	1.56	11.3	16.73	1.25	2.87 c	2.30	0.147 c
	2.4	8.60	5.80	1.48	10.7	15.53	1.13	2.28 c	2.02	0.113 c
60%	1.2	10.07	7.53	1.34	13.0	23.13	1.67	4.82 a	2.89	0.230 a
	1.8	9.93	7.33	1.35	13.0	18.53	1.59	4.26 a	2.68	0.213 a
	2.4	10.07	6.73	1.49	12.7	16.07	1.34	3.48 b	2.60	0.177 b
80%	1.2	9.93	7.83	1.27	14.0	19.80	1.64	4.45 a	2.71	0.213 a
	1.8	9.67	7.67	1.26	12.7	21.73	1.78	5.11 a	2.87	0.240 a
	2.4	9.60	6.87	1.39	11.3	17.13	1.44	3.88 b	2.69	0.200 a

^z Duncan's multiple range test, p=0.05

Table 3—98. Effect of relative humidity and EC density on middle stage of lettuce 'Omega' at 7 days after treatment.

Relative humidity (%)	EC (mS/cm)	Leaf length	Leaf width	A/B	Leaf number	Root length	Root weight	Fresh weight	S/R	Dry weight
		(A) (cm)	(B) (cm)			(cm)	(g/plant) (R)	(g/plant) (S)		(g/plant)
40%	1.2	12.80	10.20	1.25	20.0	23.67	4.17	19.89 b ^z	4.77	0.78 b
	1.8	14.27	11.47	1.24	20.0	33.80	3.70	20.48 b	5.54	0.83 b
	2.4	14.33	10.67	1.34	18.7	26.93	3.23	16.31 c	5.05	0.63 c
60%	1.2	14.93	11.80	1.27	22.7	26.87	4.33	24.03 a	5.55	0.93 a
	1.8	13.27	10.07	1.32	22.7	28.93	3.73	19.22 b	5.15	0.80 b
	2.4	14.40	10.60	1.36	21.3	26.13	3.76	21.15 b	5.63	0.80 b
80%	1.2	14.73	11.07	1.33	22.7	31.40	4.05	25.01 a	6.18	0.94 a
	1.8	14.60	11.60	1.26	22.7	20.07	3.97	22.44 b	5.65	0.91 a
	2.4	14.87	11.60	1.28	21.0	25.20	3.62	21.74 b	6.01	0.87 a

^z Duncan's multiple range test, p=0.05

3) 광환경에 따른 생육 단계별 배양액 관리

태양광 병용형 식물공장 시스템이 설치된 벤노 온실에서 반결구 상추의 재배 시에 차광률을 0, 60, 80%로 달리한 후 생육 초기와 중기에 생육조사, 광합성과 증산량을 조사하였다.

생육 초기에는 무차광에서 높은 생육을 보였고, 이 때 배양액의 농도가 1.8 dS · m⁻¹와 2.4 dS · m⁻¹에서 생육이 좋았다. 그러나 차광 60%와 80%에서는 배양액의 농도에 따른 현저한 차이는 없었다(Table 3-99).

생육 중기에도 무차광 처리에서 높은 생육을 보였다. 무차광에서는 1.2 dS · m⁻¹ 2.4 dS · m⁻¹에서, 60%차광에서 배양액 농도가 1.8, 2.4 dS · m⁻¹에서 생육이 좋았고, 차광 80%에서는 전체적인 생육이 낮았으나 배양액 농도에 따라서는 1.2, 1.8 dS · m⁻¹이 2.4 dS · m⁻¹보다 생육이 높았다(Table 3-100).

Table 3-99. Effects of shading level and nutrient concentration on the growth of butterhead lettuce 'Omega' (early stage).

Shading level (%)	EC (dS · m ⁻¹)	A/B	No. of leaves	Root weight (g/plant)	Fresh weight (g/plant)	S/R	Dry weight (g/plant)
0	1.2	1.47	12.67	1.46	3.11 b ^z	2.13	0.166b
	1.8	1.44	11.67	1.62	4.19 a	2.59	0.220a
	2.4	1.03	12.33	1.44	3.62 a	2.51	0.190a
60	1.2	1.71	10.33	1.11	2.32 c	2.09	0.100c
	1.8	1.75	9.67	0.91	2.36 c	2.59	0.103c
	2.4	1.74	10.00	1.08	2.69 c	2.49	0.113c
80	1.2	1.89	8.33	0.95	1.37 d	1.44	0.057d
	1.8	1.80	8.67	1.05	1.61 d	1.53	0.063d
	2.4	1.77	8.33	1.02	1.37 d	1.34	0.050d

^z Duncan s multiple rang test, p=0.05

A/B : leaf length / leaf width

S/R : fresh weight / root weight

Table 3—100. Effects of shading level and nutrient concentration on the growth of butterhead lettuce 'Omega' (middle stage).

Shading level (%)	EC (dS · m ⁻¹)	A/B	No. of leaves	Root weight (g/plant)	Fresh weight (g/plant)	S/R	Dry weight (g/plant)
0	1.2	1.67	22.33	3.79	30.66 a ^z	8.09	1.17 a
	1.8	1.63	24.00	3.70	25.02 a	6.76	1.08 a
	2.4	1.67	22.67	4.01	31.54 a	7.87	1.20 a
60	1.2	1.78	18.67	2.88	18.75 c	6.51	0.61 b
	1.8	1.79	19.00	2.47	20.32 b	8.23	0.72 b
	2.4	1.50	18.33	2.41	20.94 b	8.69	0.71 b
80	1.2	1.79	16.67	2.78	16.59 c	5.97	0.45 c
	1.8	1.85	15.67	3.19	16.07 c	5.04	0.50 c
	2.4	1.84	13.67	2.65	12.93 d	4.88	0.45 c

^z Duncan s multiple rang test, p=0.05

A/B : leaf length / leaf width

S/R : fresh weight / root weight

광합성과 증산량을 살펴보면 생육 초기에는 무차광에서 배양액의 농도가 1.8, 2.4 dS · m⁻¹일 때 증산량이 높은 반면 광합성은 1.2 dS · m⁻¹에서 가장 높았다. 60%, 80% 차광에서 배양액의 농도가 1.8 dS · m⁻¹일 때 증산량과 광합성이 높았다 (Table 3—101.).

Table 3—101. Effects of shading level and nutrient concentration on diffusive resistance, stomatal resistance, transpiration rate and photosynthesis of butterhead lettuce 'Omega' (early stage).

Shading level (%)	EC (dS · m ⁻¹)	Photosynthesis (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	Transpiration rate (μg · cm ⁻² · s ⁻¹)	Diffusive resistance (s · cm ⁻¹)	Stomatal resistance (s · cm ⁻¹)
0	1.2	3.09	2.51	6.00	0.52
	1.8	2.51	3.36	4.84	0.59
	2.4	2.06	3.86	6.60	0.56
60	1.2	1.19	2.86	4.48	0.51
	1.8	1.39	3.88	6.60	0.53
	2.4	1.20	2.66	6.79	0.58
80	1.2	0.49	2.05	6.79	0.53
	1.8	0.68	3.11	4.54	0.54
	2.4	0.96	2.71	5.19	0.56

생육 초기에는 무차광과 80% 차광에서 $2.4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 의 고농도일 때 증산량이 높았고 60% 차광에서는 $1.8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 의 농도일 때 높았다(Table 3-102.).

Table 3-102. Effects of shading level and nutrient concentration on diffusive resistance, stomatal resistance, transpiration rate and photosynthesis of butterhead lettuce 'Omega' (middle stage).

Shading level (%)	EC ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	Photosynthesis ($\mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\mu \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Diffusive resistance ($\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Stomatal resistance ($\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)
0	1.2	2.21	3.60	4.51	0.43
	1.8	2.41	9.56	1.57	0.43
	2.4	1.80	11.51	1.28	0.56
60	1.2	0.83	3.50	5.02	0.60
	1.8	0.95	4.72	3.75	0.51
	2.4	0.71	3.36	5.15	0.56
80	1.2	0.22	2.63	5.57	0.54
	1.8	0.60	2.72	5.29	0.55
	2.4	0.73	2.78	5.22	0.66

태양광 병용형 시스템이 설치된 벤노 온실에서 반결구 상추의 생육 초기에는 무차광에서 높은 생육을 보였고, 이 때 배양액의 농도가 $1.8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 와 $2.4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 에서 생육이 좋았다. 그러나 차광 60%와 80%에서는 배양액의 농도에 따른 현저한 차이는 없었다.

생육 중기에도 무차광 처리에서 생육이 가장 좋았다. 무차광과 60%차광에서 배양액의 농도가 $1.8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 와 $2.4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 에서 생육이 좋았고, 차광 80%에서는 배양액의 농도에 따른 현저한 차이는 없었다.

4) CO₂ 환경에 따른 생육단계별 배양액 관리

환경제어가 이루어지는 growth chamber에서 CO₂농도에 따라 처리를 달리한 후 생육 조사를 했을 때 생육 초기에는 1000, 2000 ppm 처리에서 생육이 높게 나타났다. 이 때 배양액의 농도에 따른 차이는 없었다(Table 3-103.).

또한 생육중기에서도 생육 초기와 마찬가지로 1000, 2000 ppm 처리구에서 높은

생육을 보였으며, 이 때 배양액의 농도는 1.2, 1.8 dS · m⁻¹에서 비교적 높게 나타났다(Table 3—104.).

Table 3—103. Effects of CO₂ concentration and nutrient concentration on the growth of butterhead lettuce 'Omega' (early stage).

CO ₂ Conc. (ppm)	EC (dS · m ⁻¹)	A/B	No. of leaves	Root weight (g/plant)	Flesh weight (g/plant)	S/R	Dry weight (g/plant)
400	1.2	1.90	10.33	1.18	2.49 b ^z	2.11	0.090 c
	1.8	1.82	11.33	1.27	2.62 b	2.06	0.093 c
	2.4	1.66	11.67	1.22	3.12 a	2.56	0.107 c
1000	1.2	1.79	11.33	1.32	2.58 b	1.95	0.117 b
	1.8	1.78	11.67	1.37	2.86 b	2.09	0.123 b
	2.4	1.75	10.67	1.29	2.44 b	1.89	0.120 b
2000	1.2	1.62	12.67	1.70	3.41 a	2.01	0.180 a
	1.8	1.91	11.33	1.32	2.85 b	2.16	0.160 a
	2.4	1.92	13.00	1.28	3.06 a	2.39	0.153 b

^z Duncan s multiple rang test, p=0.05

A/B : leaf length / leaf width

S/R : fresh weight / root weight

Table 3—104. Effects of CO₂ concentration and nutrient concentration on the growth of butterhead lettuce 'Omega' (middle stage).

CO ₂ Conc. (ppm)	EC (dS · m ⁻¹)	A/B	No. of leaves	Root weight (g/plant)	Fresh weight (g/plant)	S/R	Dry weight (g/plant)
400	1.2	1.61	18.00	2.92	14.24 b ^z	4.88	0.367 c
	1.8	1.52	19.00	3.47	14.11 b	4.07	0.407 c
	2.4	1.62	19.33	2.73	13.99 b	5.12	0.390 c
1000	1.2	1.41	19.00	3.64	16.13 a	4.43	0.520 b
	1.8	1.62	17.00	2.20	16.85 a	4.48	0.547 b
	2.4	1.62	18.00	2.22	14.81 b	4.87	0.510 b
2000	1.2	1.37	17.67	3.25	16.40 a	4.43	0.763 a
	1.8	1.56	17.67	3.73	17.04 a	4.57	0.737 a
	2.4	1.66	18.00	2.71	15.25 b	4.15	0.567 a

^z Duncan s multiple rang test, p=0.05

A/B : leaf length / leaf width

S/R : fresh weight / root weight

광합성과 증산량을 살펴보면 생육 초기에는 400, 1000 ppm에서 높았지만 광합성량은 1000, 2000 ppm에서 높았다. 생육 초기의 배양액의 농도는 어느 CO₂ 에서나 1.8 dS · m⁻¹서 가장 높게 나타났다(Table 3-105.).

생육 중기에는 400, 1000 ppm에서 증산량이 높았으며 광합성량은 1000, 2000 ppm에서 높았다(Table 3-106.).

Table 3-105. Effects of CO₂ concentration and nutrient concentration on diffusive resistance, stomatal resistance, transpiration rate and photosynthesis of butterhead lettuce 'Omega' (early stage).

CO ₂ Conc. (ppm)	EC (dS · m ⁻¹)	Photo- synthesis ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Diffusive resistance (s · cm ⁻¹)	Stomatal resistance (s · cm ⁻¹)
400	1.2	5.45	3.05	5.26	1.30
	1.8	7.16	3.58	4.46	1.07
	2.4	3.93	3.22	4.96	1.47
1000	1.2	5.81	3.92	3.94	1.29
	1.8	7.68	4.09	3.78	1.35
	2.4	3.82	3.85	4.06	1.87
2000	1.2	4.41	2.21	6.17	2.92
	1.8	8.77	2.38	5.92	1.95
	2.4	4.31	1.73	9.12	2.42

Table 3—106. Effects of CO₂ concentration and nutrient concentration on diffusive resistance, stomatal resistance, transpiration rate and photosynthesis of butterhead lettuce 'Omega' (middle stage).

CO ₂ Conc. (ppm)	EC (dS · m ⁻¹)	Photo- synthesis (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	Transpiration rate (μg · cm ⁻² · s ⁻¹)	Diffusive resistance (s · cm ⁻¹)	Stomatal resistance (s · cm ⁻¹)
400	1.2	3.86	3.34	4.63	1.15
	1.8	4.98	4.89	3.22	0.93
	2.4	4.63	3.90	3.87	1.11
1000	1.2	3.79	4.56	3.63	1.98
	1.8	5.96	5.61	2.76	2.34
	2.4	4.66	4.84	3.25	2.25
2000	1.2	4.50	1.49	10.49	2.45
	1.8	7.48	2.85	5.39	2.06
	2.4	4.61	3.77	3.97	1.85

따라서 환경제어가 이루어지는 완전제어형 식물공장의 축소판인 growth chamber에서 생육 초기에는 CO₂ 농도와 배양액의 농도에 따른 생육의 차이는 뚜렷하지 않았다. 생육 중기에는 CO₂ 농도가 1000~2000 ppm에서 생육이 높게 나타났고, 이 때 적정 배양액의 농도는 1.2~1.8 dS · m⁻¹로서 2.4 dS · m⁻¹의 고농도에서 보다 높은 생육을 나타냈다.

아. 재배환경 및 생체정보에 따른 과채류 배양액관리

광합성, 호흡, 증산, 흡수 및 엽온은 식물체 내에서의 물질이동을 일으키는 생체 반응이며 성장이나 생육과 밀접한 관계를 가지므로 이들의 계측은 환경조절과 지하부 환경제어에서 매우 중요하다. 광합성과 호흡은 단시간의 성장반응이며 작물의 여러 가지 생체반응계측 중에서 특히 중요하다. 이처럼 CO₂를 고정하는 광합성에 의해서 식물체가 만들어지며 그 일부를 이용한 호흡에 의해서 생명이 유지되고 발육한다. 따라서 환경변화에 따른 영향으로 광합성량이 적을 경우, 작물은

양호한 생육과 발육을 기대할 수 없다. 한편 증산속도와 확산저항은 재배식물별 적절한 급액 계획에 있어서 매우 중요하다. 증산이나 흡수에 의해서 뿌리로부터 무기양분 및 대사산물이 운반되고, 기공활동과 증산작용에 의하여 체온조절이 행해진다. 엽온은 열수지 해석에 있어서 매우 중요한 물리적 변수로써 최근에는 기공개도와 수분생리의 관계를 규명하는 데 있어서 중요한 의미를 가지고 있다. 이러한 생체 정보계측은 식물공장과 같이 고도의 환경제어가 이루어져야 하는 경우에 환경제어 분야에서 배양액 관리와 생육진단 분야에서 새로운 접근으로써 식물 생체 정보계측이 이루어져야 한다.

근권환경요인중 배양액 농도, pH, 근권온도, 수분스트레스를 비롯한 광조건에 따른 배양액 관리 기술을 확립에 필요한 기초기술을 얻고자 각 환경요인들의 최적수준에서 각 용인의 증가와 감소와 같은 변화를 주었다. 이때 작물의 생체정보를 얻어 실제 식물공장 재배 현장에서 이들 정보를 활용한 배양액 관리 가능성을 검토하고자 오이를 대상으로 실험하였다.

오이 배양액 pH stress에 대한 생체반응을 계측한 결과 pH를 높이거나 낮추었을 때 오이 광합성과 증산의 감소와 확산저항의 증가가 처리 3시간 이후부터 뚜렷하게 나타나고 있어 근권 pH변화를 생체계측으로 예측 할 수 있다는 것을 보여 주었다.

배양액 농도 stress에 따른 오이 광합성은 처리 6시간 후부터 감소하기 시작하였으며, 확산속도와 기공저항은 3시간 이후부터 나타나기 시작하여 10.5시간 후에 급속히 증가하는 경향을 보였다. 한편 증산량과 확산저항의 생체반응은 처리 3시간 이후부터 변화가 급속히 나타났으며, 특히 배양액 농도 증가가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

NaCl과 PEG를 이용한 근권 수분 stress 반응은 광합성, 확산속도, 기공저항의 생체 반응이 4.5시간부터 나타나기 시작하였으며, 증산량과 확산저항은 처리 3시간부터 급속히 감소 및 증가로 나타나 근권 수분장해의 발생가능성을 생체반응 결과로 예측할 수 있다는 것을 나타냈다.

근권온도 변화에 대한 오이 생체반응은 근권온도가 높아짐에 따른 반응보다 근권온도가 낮아지면서 광합성, 확산속도, 기공저항 증산량 및 확산저항등의 큰 변화

를 나타내 상추와는 다른 양상을 보였는데 이것을 오이의 생육적온이 높고 고온에 대한 내성이 상대적으로 크기 때문으로 보인다.

이상의 오이에 대한 근권 환경변화에 대한 생체반응이 빠르게 반응을 하고 있어 비파괴적인 생체계측에 의한 배양액 관리의 이상여부를 판단할 수 있고, 이를 바탕으로 원인을 추적하여 배양액 관리를 할 수 있는 프로그램 개발이 가능하고 필요하다는 것을 보여주었다.

1) 근권내 pH에 따른 오이 생체 반응 및 배양액 관리

증산량은 pH가 8.0처리부터 pH감소는 5.0부터 뚜렷하게 감소하는 경향을 보였다. 전기전도도와 기공저항은 경향을 파악하기 어려웠으나, 확산저항의 경우 pH 증가는 7.5부터 pH감소는 5.0부터 증가하는 경향을 보여주었다. 엽록소 함량은 근권내 pH에 따른 변화를 확인하기 어려웠다.

증산량 측정기기를 이용한 증산량 및 확산저항계측이 오이 근권내 pH 환경변화에 대한 반응이 빠르고 명확하게 나타났다. 오이는 pH의 증가보다는 pH감소에 따른 stress반응이 민감함을 알 수 있었으며, 이를 확산저항으로 신속히 stress 상황을 확인할 수 있어 환경제어에 이용할 수 있을 것으로 보였다.

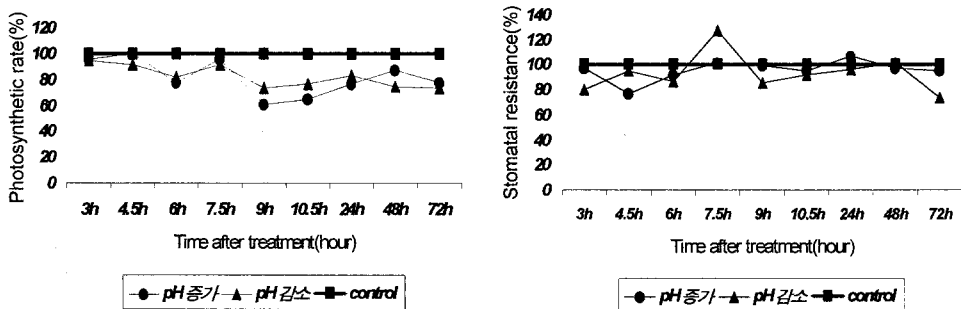


Fig 3—61. Effect of pH stress on Photosynthetic rate and Stomatal resistance of *Cucumis sativus* L.

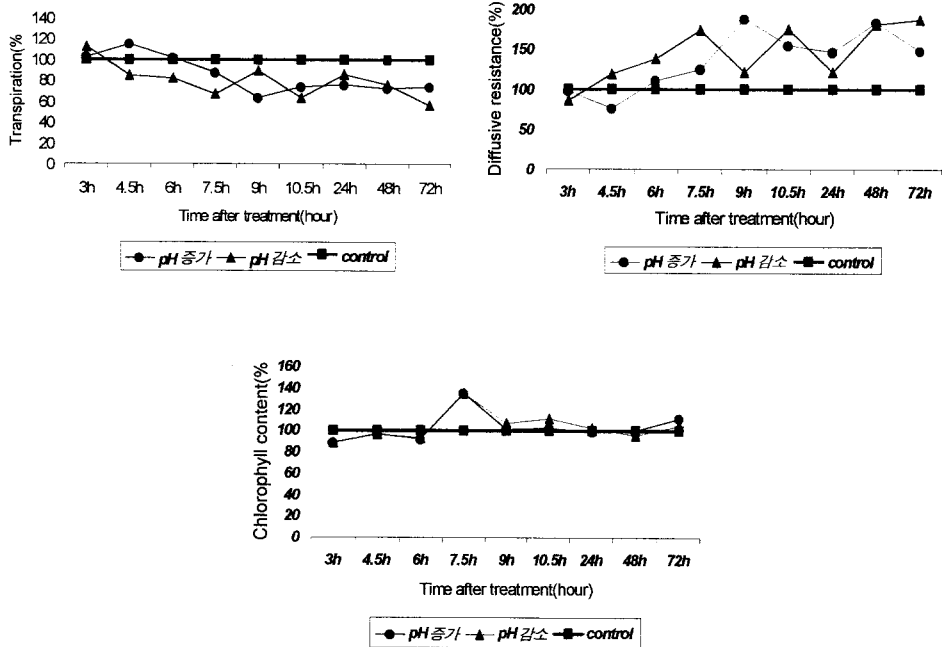


Fig 3—62. Effect of pH stress on Transpiration, Diffusive resistance and Chlorophyll content of *Cucumis sativus* L.

2) 근권내 EC에 따른 오이 생체 반응 및 배양액 관리

광합성은 EC가 증가하는 경우 8.0mS/cm부터 급격히 감소하는 경향을 보였으며, EC가 감소하는 처리에서는 1.0mS/cm 1시간후까지는 증가하는 경향을 보이다가 3시간이후부터는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 기공저항역시 비슷한 경향을 보였다. 오이 증산량은 EC증가처리구에서는 4.0mS/cm부터 EC감소처리구는 1.5mS/cm 3시간처리 이후부터 감소하였는데 EC증가가 더 급격하게 감소하는 경향을 뚜렷하게 보였다. 확산저항 역시 증산량과 비슷한 경향으로 증가했다. 엽록소 함량에 있어서는 EC증가는 뚜렷한 경향이 없다가 처리 72시간에 급격한 증가를 보였으며, EC감소는 엽록소 함량이 1.5mS/cm처리 3시간 이후부터 감소하는

경향을 보였다.

따라서 근권내 EC변화계측은 확산저항측정으로 가장 빨리 그리고 정확하게 생육진단 및 근권환경제어에 이용할 수 있다는 것을 보여주었다.

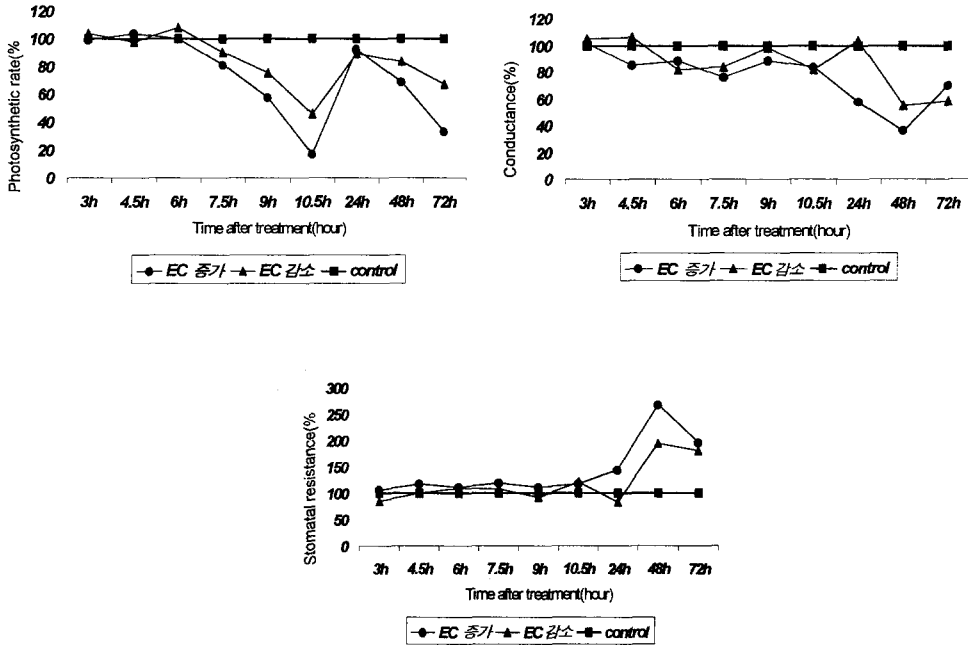


Fig 3—63. Effect of EC stress on Photosynthetic rate, Conductance, Stomatal resistance of *Cucumis sativus* L.

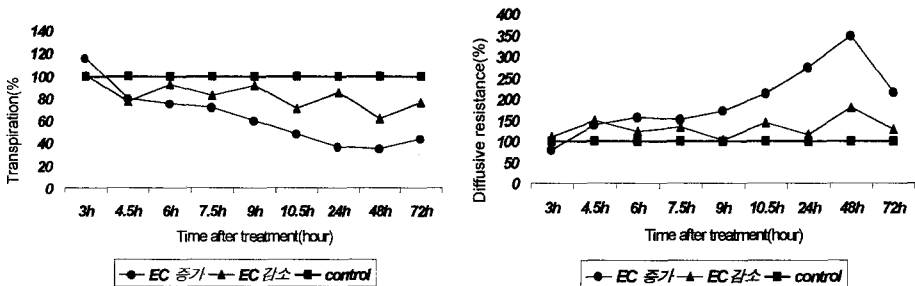


Fig 3—64. Effect of EC stress on Transpiration and Diffusive resistance of *Cucumis sativus* L.

3) 근권내 수분 stress에 따른 오이의 생체반응

광합성 및 기공전도도, 기공저항은 NaCl 6.0mS/cm부터 광합성은 감소하고 기공 전도도 및 기공저항은 감소하는 경향을 보여주었으며, 증산량 및 확산저항은 NaCl 4.0mS/cm부터 증산량은 감소, 확산저항은 증가하는 뚜렷한 경향을 보여주었다. 엽록소 함량의 경우 특별한 경향은 볼 수 없었다.

증산량 및 확산저항이 광합성 및 기공전도도, 기공저항보다 수분stress에 빠르게 반응하고 경향 또한 분명하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 광합성 보다는 증산량 및 확산저항 측정이 수분stress에 의한 비파괴적인 생체측정에 더 활용 가능성이 큰것을 알 수 있었다.

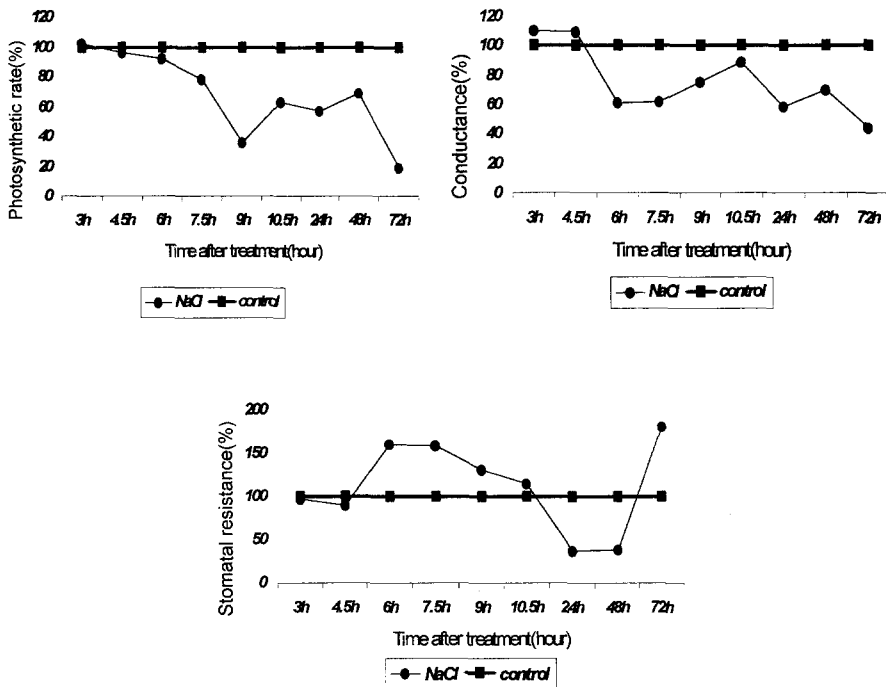


Fig 3—66 Effect of water stress on Photosynthetic rate, Conductance, Stomatal resistance of *Cucumis sativus* L.

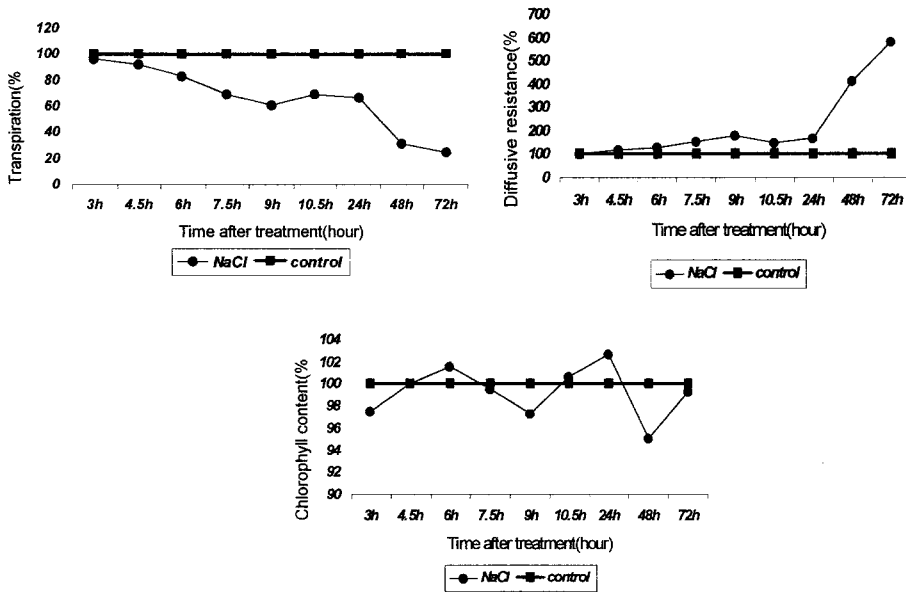


Fig 3—67. Effect of water stress on Transpiration, Diffusive resistance, Chlorophyll contents of *Cucumis sativus* L.

4) 광환경에 따른 오이의 생체 반응 및 배양액 관리

광합성의 경우 광환경과 직접적인 관계가 있기 때문에 처리 3시간후 측정부터 급격히 감소하였으며, 24시간후부터는 차광된 환경에 적응하여 다소 광합성이 증가함을 볼 수 있었다.

증산량의 경우 차광 4.5시간이후부터 급격히 감소하다가 차광 9시간 이후에 다소 적응함을 볼 수 있었다. 확산저항의 경우 4.5시간이후부터 뚜렷하게 증가하였으며 7.5시간 이후에는 확산저항이 다소 적응하여 감소함을 볼 수 있었다. 엽록소 함량의 경우 전체적으로 감소하였으나 그 경향은 뚜렷하지 않았다.

따라서 광환경에 따른 생체반응계측에 있어 광합성과 증산량 확산저항계측이 가능성있음을 볼 수 있었다.

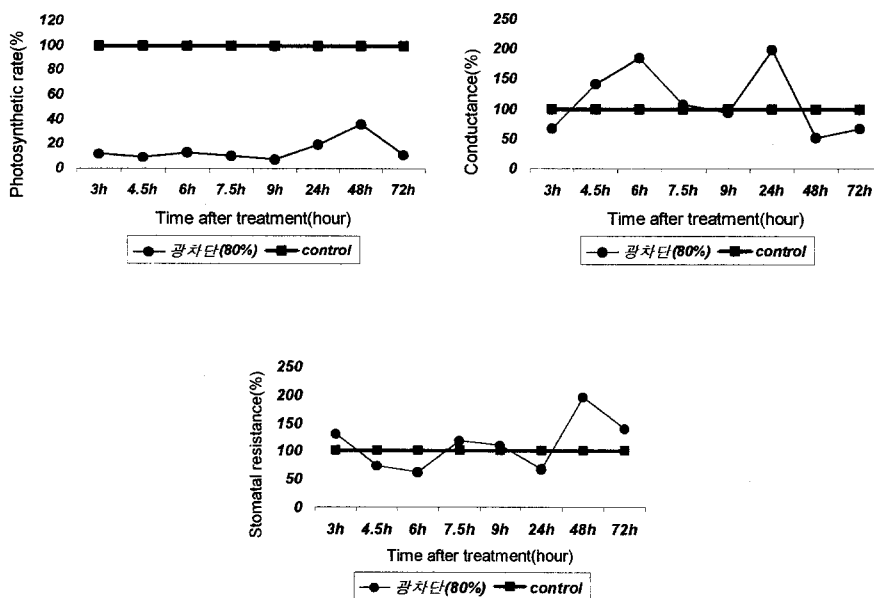


Fig 3-68. Effect of Light stress on Photosynthetic rate, Conductance, Stomatal resistance of *Cucumis sativus* L.

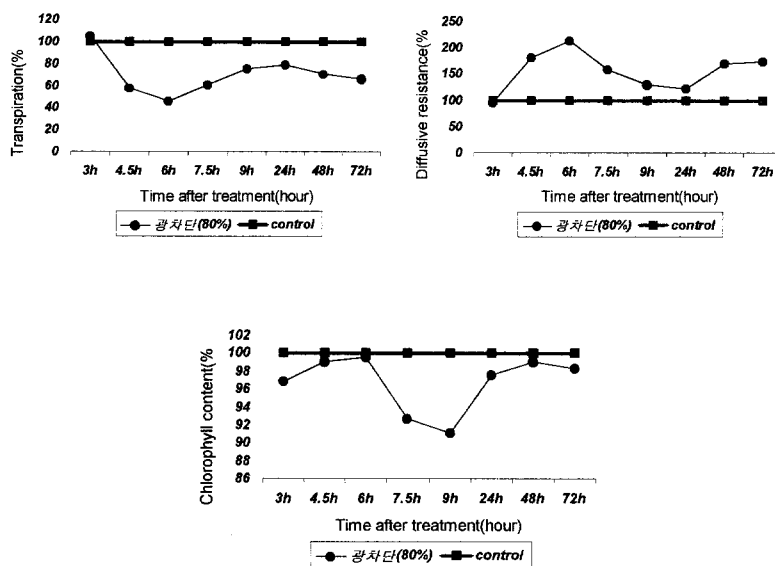


Fig 3-69. Effect of light stress on Transpiration, Diffusive resistance, Chlorophyll contents of *Cucumis sativus* L.

5) 근권 온도에 따른 오이의 생체반응 및 배양액 관리

온도 증가는 광합성에 있어 큰 차이를 보이지 않았으나 처리 24시간 이후부터 감소함을 보여주었으며, 온도 감소는 처리 4.5시간이후부터 감소하는 경향을 보였으나 7.5시간 이후부터 다소 낮은 근권온도에 적응함을 보였다. 기공저항의 경우 초기에는 온도증가보다 온도 감소가 더 컸으나, 장기화 될수록 온도가 증가할 때 식물의 기공저항은 커짐을 알 수 있었다.

증산의 경우 근권온도 증가는 초기에 오히려 높음을 볼 수 있고, 반면 온도 감소는 증산률이 초기에 낮았다. 확산 저항의 경우 초기에는 온도감소가 높았으나, 장기화 될 수 록 온도가 증가할 때 확산저항치가 높았다. 엽록소 함량은 근권온도 감소의 다소 증가하는 경향을 보였으며, 근권온도 증가의 경우는 뚜렷한 양상을 보이지 않았다.

근권온도에 따른 생체반응은 광합성 및 증산량, 기공저항 확산저항 모두에서 그 반응을 보이지만, 근권온도 감소가 생체반응을 먼저 보인다. 또한 초기에는 근권온도 감소가 영향을 많이 끼치나 장기화 될수록 근권온도 증가가 오이의 생체반응에 더 큰 영향을 끼침을 알 수 있었다.

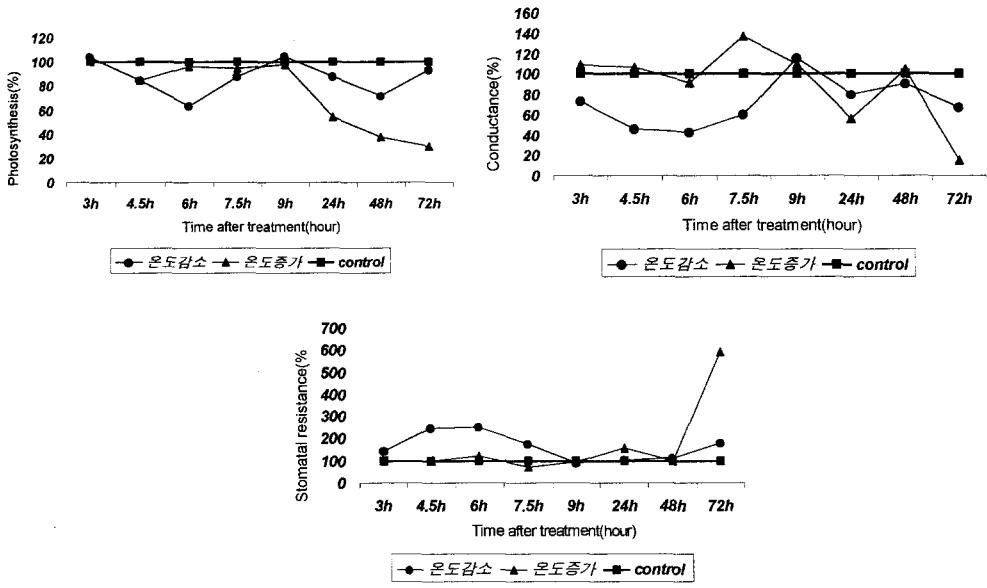


Fig 3-70 Effect of root temperature stress on Photosynthetic rate, Conductance and Stomatal resistance of *Cucumis sativus* L.

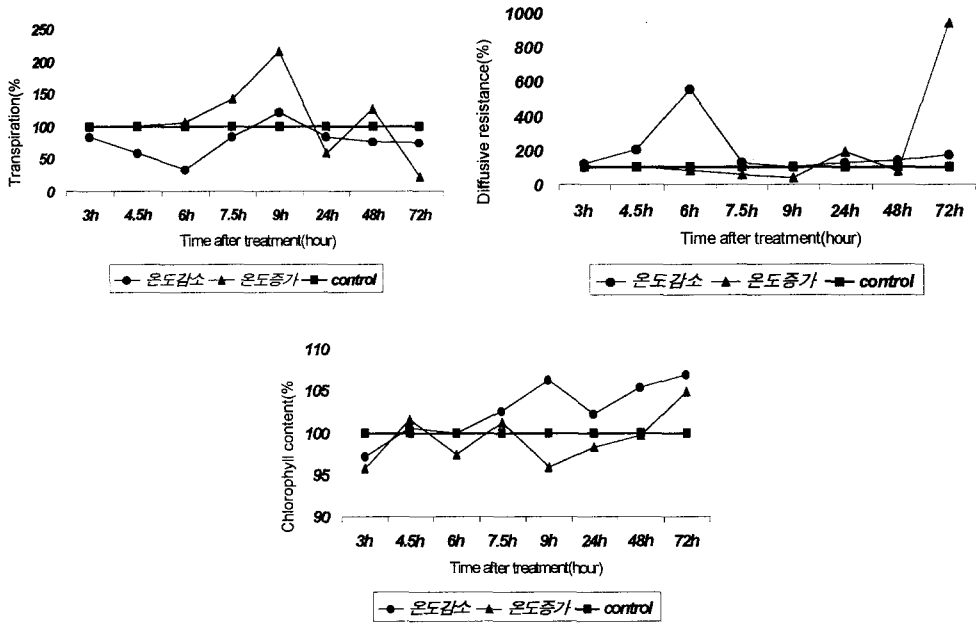


Fig 3-71. Effect of root temperature stress on Transpiration, Diffusive resistance and Chlorophyll content of *Cucumis sativus* L.

3. 적요

식물공장에서 작물생산성의 극대화를 위한 경제적이고 효율적인 환경제어를 위해서 최적환경구멍이 요구되고 있다. 이에 최적 지상부 환경구멍과 이에 따른 최적 지하부 환경요인과의 관계를 밝히고자 하였다.

식물공장의 지상부 최적 환경 구멍을 위해 광도, 온도, 습도와 CO₂ 농도 조건을 달리하여 잎상추의 생육과 품질을 비교한 결과 일반적인 상추의 생육조건 보다 약간 높은 광도와 온도인 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이상과 주간/야간 온도는 22/18°C의 범위에서 최고의 생육과 품질을 나타냈다. 습도와 CO₂농도는 각각 60~80%와 1000~2000 mg L^{-1} 로 유지되었을때 가장 좋은 생육을 보였다.

지상부 환경요인들과의 지하부 환경요인과의 관계를 밝히기 위해서 기온, 광도, 배양액농도간의 관계가 잎상추 생육과 품질에 미치는 영향을 조사한 결과 저광도에서 배양액농도가 높은 편인 2.4 mS cm^{-1} 에서 고광도에서는 1.8 mS cm^{-1} 수준에서 생육량이 많게 나타났다. 기온과 배양액농도와의 관계에서 생육량은 광도조건보다는 기온의 영향이 큰 것으로 나타났으며 저온에서는 고농도로, 고온에서는 저농도로 관리하는 것이 바람직하다는 결론을 나타내 주었다. CO₂ 농도, 광도와 배양액농도, CO₂를 달리 하여 이들이 잎상추 생육에 미치는 영향을 조사한 결과 CO₂ 시비시 적정광도 수준은 200~300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 나타났으며, 배양액 농도 1.2~4.8 mS cm^{-1} 수준에서 특별한 생육 차이를 볼 수 없었다.

근권내 영양조건에 따른 상추의 생체반응을 계측하여 본 결과 다량원소 및 미량원소의 농도가 증가할수록 광합성 및 증산률이 차츰 증가하였다가 최적 농도를 기점으로 다시 감소하는 포물선이 나타남을 살펴볼 수 있었다. 따라서 생체계측을 통한 배양액 관리가 가능할 것으로 판단되었다. 또한 생육 단계에 따른 상추 및 미나리의 양수분 흡수 특성을 구명함으로써 최적 배양액 조건을 구명하였다.

생육 단계별 재배환경에 따른 배양액 관리에서는 온도환경의 경우 생육 초기에는 28/24°C에서 EC 1.2~1.8 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 로 관리할 때 고품질 상추의 생산이 가능하였으며 생육중기에는 저온일때는 고농도로 고온일때는 저농도 관리가 생육이 좋은 것으로 나타났다. 습도환경은 생육초기에는 60~80%일 때 EC 1.2~1.8 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 가 생

육증기에는 40-80%에서 EC 1.2-2.4dS · m⁻¹사이에 큰 생육차이를 보이지 않았다. 광환경은 무차광 환경이 대체적으로 좋았으며, EC 1.8-2.4에서 생육이 가장 좋았다. CO₂는 생육초기에는 CO₂농도 및 배양액 농도간의 생육 차이가 뚜렷하기 나타나지 않았으나, 생육후기에는 1000-2000ppm의 고농도 시용에서 EC 1.2-1.8dS · m⁻¹일 때 가장 생육이 좋은 것으로 조사되었다.

과채류 재배환경 및 생체정보에 따른 배양액 관리방안을 살펴본 결과에서는 pH, EC, water, 광, 근권온도 Stress하에서 최적의 환경보다 생리활성이 떨어지는 것을 살펴볼 수 있었으며, 광합성, 증산량, 기공저항 및 확산저항을 비파괴적으로 계측해 봄으로써 식물의 생육상태를 역으로 추측할 수 있을 것으로 보였다. 특히 확산저항 및 증산률 계측은 상당히 식물체가 환경변화에 민감하게 반응하는 요인으로 판단되었다.

이와 같은 실험결과를 토대로 엽채류 식물공장에서 최적 지상부 및 지하부 환경구명에 의한 제어는, 고품질 균일한 작물의 경제적, 효율적인 생산을 가능하게 할 것이며 향후 기술집약형 온실 및 식물공장 시스템에의 적용에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

제 4 절 재배식물별 최적 양액재배 시스템 개발

1. 재료 및 방법

양액의 pH와 EC는 매일 오후 5시경 간이측정기(TOA pH meter; HM-14P, EC meter; CM-14P) 측정하였으며, 식물 분석을 위해 생체중을 측정한 후 80℃에서 72시간 정도 잘 건조한 후 건물중을 측정하고 마쇄하여 일부는 질산태질소 측정(Cataldo 등, 1975)에, 일부는 습식분해하여 AAS(Perkin Elmer, AAS 3300)로 K, Ca, Mg을 측정하였고, 암모니아태질소는 Kjeldhal법으로 PO₄-P는 vanadate법(농촌진흥청 농업기술연구소, 1988)으로 비색 측정하였다.

자료분석으로 SAS의 Duncan multiple range test를 통해 5% 수준으로 유의성 검정을 수행하였다.

가. 최적 수경재배 시스템 구명

식물공장에서 채용가능한 수경재배시스템은 담액수경(DFT), 박막수경(NFT), 분무경(Aeroponic)등이라 할 수 있다. 이들 시스템간의 차이가 작물생육에 미치는 영향을 검토하기 위해서 3월 2일 파종하여 4월 10일에 각 시스템으로 정식 후 생육상황을 조사하였다.

나. 생산 시스템에 따른 작물의 생육반응

본 실험의 공시 작물은 상추(홍농 적측면, 1월 25일 정식, 2월 19일 수확), 시금치(한농 극광품종, 3월 19일 정식, 4월 11일 수확) 및 미나리(보성지방종 실생, 4월 27일 정식, 5월 26일 수확)였으며, 유리온실 내에서 수행되었다.

재배 시스템은 크게 분무수경과 담액수경 및 박막수경으로 구분하였는데, 분무

수경은 2분(MS-1)과 5분(MS-2) 간격으로 양액을 분무하였고, 담액수경은 수위가 5cm 유지되도록 하였으며, 박막수경은 1cm 이하가 되도록 하였다. 담액수경과 박막수경은 공히 15분 간격으로 급액되도록 설정하였다. 베드의 크기는 분무수경에서 160cm×60cm였으며, 베드의 깊이는 20cm가 되도록 하고, 분무 노즐을 이용하여 양액이 급액되도록 하였다. 담액과 박막수경에서는 베드의 크기는 같으나 수위가 유지되도록 베드깊이를 달리 하였으며 양액은 모든 처리 공히 200L씩으로 하였다.

상추의 양액조성은 山崎 처방에 의한 것으로 K 4, Ca 2, Mg 1, PO₄-P 1.5 및 NO₃-N 6 me/L였으며, 시금치는 박막수경용 양액조성으로 K 12, Ca 4, Mg 4, PO₄-P 4 및 NO₃-N 16 me/L였다. 미나리는 전용양액으로 K 4, Ca2, Mg 1, PO₄-P 3 및 NO₃-N 11 me/L였다. Fe는 3ppm이 되도록 하였고, 미량원소로서 B 0.5, Mn 0.5, Zn 0.05, Cu 0.02 및 Mo 0.01ppm을 공급하였다.

양액의 pH와 EC를 매일 10:00경에 측정하였으며 필요에 따라 H₂SO₄와 NaOH를 이용하여 보정하였다. 그리고 기온과 양액의 온도 및 근권부 온도는 CR-10X(Campbell Sci. Inc.)를 이용하여 수집하였다.

한 처리당 완전 임의 배치로 3반복 수행하였으며, 반복당 30개체씩 정식하여 수확시 6개씩 sampling하여 생육을 조사하고 엽중 엽록소 함량을 분석하였는데, 100% 에탄올로 24시간 추출하여 649와 665nm에서 비색 측정(spectrophotometer, Shimadzu UV-1601)한 후 아래 식에 의해 계산하였다. 엽면적은 LI-3100 leaf area meter(Li-Cor Inc.)로 측정하였다.

$$\text{chlorophyll a} \quad (\text{mg/l}) = 13.7A_{665} - 5.76A_{649}$$

$$\text{chlorophyll b} \quad (\text{mg/l}) = 25.8A_{649} - 7.6A_{665}$$

$$\text{total chlorophyll} \quad (\text{mg/l}) = 6.1A_{665} + 20.04A_{649}$$

다. 생육단계별 재배시스템 변경에 따른 작물의 생육

상추(홍농청치마, '98. 6. 12 파종, 7. 13 정식)와 미나리(보성지방종, '98. 7. 19 파종, 8. 25 정식)을 공시하였고, 상추 양액은 山崎 처방액 1/2배 농도로, 미나리

양액은 전용양액에 K 2 me/L를 추가하여 각각 100L씩 공급하였다.

재배방식은 상추와 미나리 공히 정식후 10일째까지는 DFT로 재배하다 그 이후 20일째 각각 NFT에서 분무경(A), 25일째까지 분무경(B), 20일째 NFT, 25일째까지 분무경(C)으로 근권부 환경을 변경시켜 주었고, 대조구로 정식부터 종료까지 DFT(D)로 공시하였다.

분무경의 경우 각 1분마다 분무되도록 조절하였고, DFT와 NFT는 15분 간격으로 양액이 급액되도록 하였다. 처리당 정식판 4개에 상추 40개체, 미나리 44개체를 정식하였고 재배 시스템을 변경할 때마다 양액을 전량 갱신하였다. 그리고 각 변경시마다 8주씩 채취하여 기초 생육조사와 무기물을 분석하였다.

라. 생육단계별 액면저하에 따른 작물의 생육

홍농 청치마 상추를 '98. 8. 21일에 파종하여 9. 22일에 정식하였으며 육묘방법은 위 시험과 동일하였다. 정식시의 양액조성은 일본원시 표준액의 1/2배 농도로 공시하였고 bed 당 150L씩 공급하였다.

베드의 처리로는 대조구로서 양액 깊이가 10 cm인 DFT와 1.5 cm인 NFT를 공시하였고, 유동적 액면저하법으로 양액높이를 생육초기 10 cm로 유지하다 정식후 10일째부터 매 5일마다 2.5 cm씩 낮추어 15일째 7.5, 20일째 5.0 cm로 유지하였다.

정식시의 pH는 DFT와 NFT에서 각각 6.84 및 유동식에서는 6.89였다. EC는 DFT, NFT 및 유동식 모두 1.32 dS/m였다.

정식후 10일째와 20일째에 식물체를 채취하여 생육조사를 행하였다.

마. 식물공장에 적합한 양액재배 시스템 및 배양액 종합관리 software개발

배양액 처방 기준의 수집과 정리작업을 거쳐 순서도의 구현은 Microsoft사의 Visual Basic 5.0으로 메인 작업을 하였으며, 컨트롤 작업은 Borland사의 Delphi

3.0으로 18개월 걸쳐서 수행하였다. 프로그램 구현은 퍼지 이론등 다양한 기법이 도입되고 있으나, 프로그램 특성상 많은 다중 조건문과 반복문을 필요로 하므로 프로그램 계산 속도를 최적화시키는데 주안점을 두었다. 몰량, 비료염의 농도, 배양액, 종류, 원액 비료염의 조성 처방기준, 처방 기준의 수준, 계산 방식 등을 각각의 독립적인 컨트롤로 제작하였다.

하지만 아직까지 장기간 신뢰성 높은 이온센서가 상용화되지 않아서 배양액 분석후 나온 이온 변화 수치를 입력하면 첨가해야 할 원액 비료량이 계산되는 프로그램을 개발하였다.

2. 결과 및 고찰

가. 생산 시스템에 따른 작물의 생육반응

1) 최적 수경재배 시스템 구명

세 시스템내에서도 용존산소함량을 증가시킨 경우과 기본 시스템의 광합성과 증산량은 세 시스템 모두 배양액내 용존산소함량을 높였을 때 높게 나타났다. 시스템간에는 분무경, NFT, DFT순으로 나타났다. 기공확산저항은 용존산소 함량이 높은 시스템에서 낮게 나타났다. 잎상추(Grand rapids)의 초기생육은 분무경에서 가장 높았으며, NFT와 DFT간에는 큰 차이를 보이지 않았다. 시스템내에서 용존 산소 함량이 가장 높은 생육량을 나타내고 있다. 수확기 상추 생육은 시스템간에서 분무경이 가장 높은 생육량을 나타냈으며, 다음으로 NFT였으며, DFT에서 낮게 나타났다. 배양액 용존산소 증대는 전체적으로 생육량 증가 효과가 뚜렷하였다.

Table 3-106a. Effects of early stage growth of lettuce between hydroponic system and DO level.

System	DO level (mg · L ⁻¹)	CO ₂ assimilation (μ mol · m ⁻² · s ⁻¹)	Transpiration (μg · cm ⁻² · s ⁻¹)	Diffusive resistance (s · cm ⁻¹)
DFT	6.0-7.0	5.886	9.916	1.325
DFT	7.0-8.0	8.563	11.880	1.105
NFT	7.0-7.5	7.233	13.526	1.550
NFT	7.5-8.0	8.328	14.120	1.375
Aeroponic	7.0-7.5	8.230	14.220	1.380
Aeroponic	7.5-8.0	8.329	15.720	1.195

Table 3-107b. Effects of early stage growth of lettuce between hydroponic system and DO level.

System	DO level (mg · L ⁻¹)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
					Top	Root	Top	Root
DFT	6.0-7.0	20.3	20.7	15.9	78.1	17.7	4.37	1.16
DFT	7.0-8.0	22.7	21.0	18.6	121.8	22.5	6.18	1.40
NFT	7.0-7.5	21.3	21.5	17.3	83.9	19.0	4.22	1.27
NFT	7.5-8.0	23.7	22.3	19.6	117.6	22.3	5.71	1.34
Aeroponic	7.0-7.5	22.7	20.3	17.2	122.3	32.8	6.04	1.91
Aeroponic	7.5-8.0	27.0	21.8	17.5	138.1	31.7	7.21	1.89

Table 3-106c. Effects of middle stage growth of lettuce between hydroponic system and DO level.

System	DO level (mg · L ⁻¹)	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
					Top	Root	Top	Root
DFT	6.0-7.0	24.5	24.0	19.2	130.4	24.7	6.67	1.66
DFT	7.0-8.0	26.0	28.1	20.1	207.6	32.3	9.06	1.80
NFT	7.0-7.5	29.0	26.5	20.1	180.9	32.6	8.10	1.90
NFT	7.5-8.0	29.7	25.8	21.5	218.7	36.4	9.09	2.16
Aeroponic	7.0-7.5	26.3	27.1	19.8	209.2	31.9	8.78	1.71
Aeroponic	7.5-8.0	30.4	26.2	21.2	281.8	48.8	14.93	2.76

2) 각 재배 시스템에 따른 상추의 생육반응

양액을 15분 및 2분간 분무하는 분무수경과 5cm 담액수경 및 1cm 박막수경에서의 pH와 EC의 변화를 살펴보면 아래 Fig. 3-72과 같다.

재배 기간 중의 pH 변화는 대체로 분무수경과 담액 및 박막수경으로 대별되었는데, 분무수경에서는 초기 9일째까지 감소하다 점차 증가하여 최종 수확시에는 8.2까지 상승하였다. 2분씩 급액한 분무수경에서 그 변화의 폭이 15분 급액방식보다 약간 크게 나타났다. 담액수경과 박막수경에 있어서도 초기 8일째까지 pH가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였는데, 담액수경보다 박막수경에서 그 상승률이 더딘 편이었다. 이렇게 생육기간이 진전됨에 따른 pH의 변화는 양액내 이온간의 불균형 흡수에 기인하며, 특히 암모니아태질소의 우선 흡수에 의해 pH가 감소하였다가 질산태질소의 흡수에 따른 상승으로 생각된다.

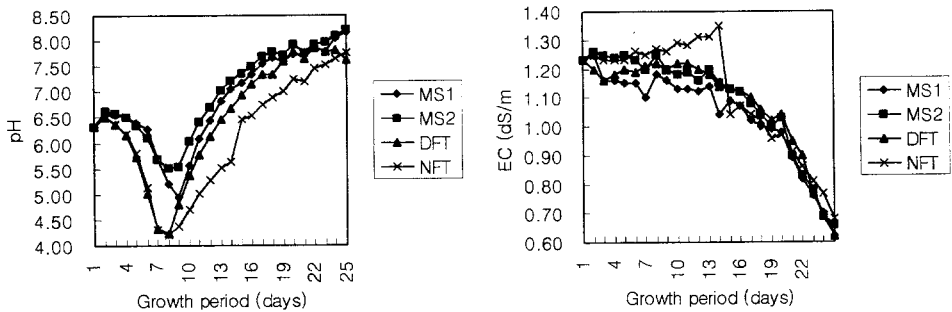


Fig. 3-72. The change of pH and EC of nutrient solutions in mist spray, NFT and DFT during lettuce culture. In legends, MS1 and MS2 are mist spray pumping on 2, 15 minutes and off consequent 2, 15 minutes, respectively.

EC는 박막수경을 제외한 나머지 시스템에서 생육중반기까지 일정한 하강곡선을 보이다가 생육중반 이후에 급격한 감소를 보였다. 이는 상추의 생육에 따라 초기에는 양수분의 흡수가 더디다가 일정한 기간이 경과한 이후에 급속한 생장에 따라 왕성한 흡수가 이루어진 것으로 생각된다. 박막수경의 경우에는 생육 중기까지

조금씩 증가하여 14일째 1.35였으며, 고농도에 의한 생육장해가 나타나 수돗물로 양액농도를 다른 처리구와 유사하게 조정하여 주었다. 그 이후 다른 처리구와 유사하게 EC가 변하였다.

Fig. 3-73은 재배기간 중 베드와 양액 탱크 및 기온을 재배기간에 걸쳐서 각 시간대별로 평균을 나타내는 것이다.

대체로 박막수경이나 분무수경에서의 근권부, 양액의 온도는 외부 기온에 크게 영향을 받았으며, 주간에 상승하는 외기에 따라 양액의 온도가 증가하다가 야간에 외기가 떨어지면서 다시 하강하는 경향을 나타냈다. 각 시스템별로 살펴보면 담액수경보다 분무수경에서 액온이나 근권부 온도가 2℃ 정도 높게 나타났으며, 양액의 온도가 더 높게 나타나 결국 베드내의 근권부 온도는 양액온도에 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

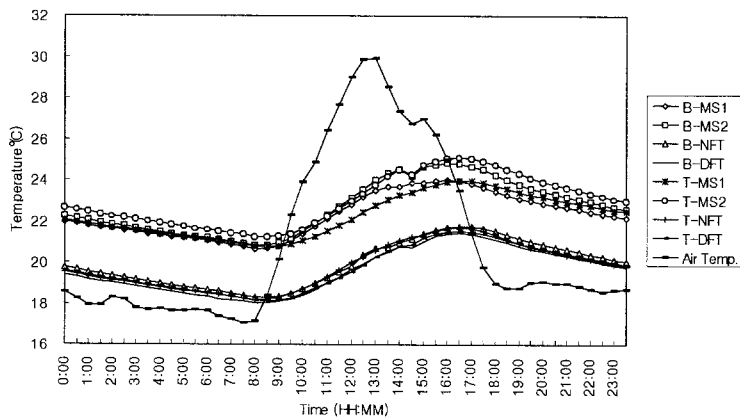


Fig. 3-73. The Fluctuation of diurnal mean temperature of air, rhyzosphere and nutrient solution changed culture system. In legends, B is bed and T is tank.

다음 Table 3-107은 수확시 상추의 생육을 나타낸 것이다.

상추의 지상부 생육은 엽수, 엽장, 엽경, 생체중 및 건물중에서 2분 간격으로 급액한 분무수경(MS-1)한 것이 가장 양호하였으며, 담액수경에서 가장 열악한 생육을 보였다. 특히 근권부 생육에서 유의적인 변화를 보였다. 주근의 생장은 2분 간격으로 분무한 시스템에서 가장 길었으나, 뿌리의 부피(뿌리가 퍼지는 정도)는 생

육이 우수한 2분 간격 분무수경에서 가장 적었고, 생육이 열악한 15분 간격 분무수경에서 세근의 형성이 많았던 것으로 나타났다. 그러나 지상부 생체중을 보면 담액수경에서 가장 낮게 나타난 반면 지하부 생체중은 2분 간격 분무수경에서 가장 낮게 나타나는 상이한 결과를 보였다. 지상부 건물중은 생체중과 비슷한 경향을 보였는데, 이는 분무간격에 따른 액온의 변화가 양수분 흡수에 영향을 미쳐 지상부와 지하부에 각각 다른 반응을 나타내는 것으로 생각된다.

Table 3-107. The effects of culture system on lettuce(*Lactuca sativa* L.) growth at harvest.

System ^z	No. of leaves	Leaf length	Leaf width	Root length	Root volume
		(cm)	(cm)	(cm)	(ml)
MS-1	13.67 a ^y	25.20 a	19.52 a	53.55 a	6.20 b
MS-2	13.33 a	24.78 a	17.78 b	46.55 ab	8.65 a
DFT	11.17 c	20.93 b	15.57 c	26.81 c	7.80 ab
NFT	12.17 b	24.20 a	17.10 bc	40.98 b	8.00 ab

	Fresh weight (g)		Dry weight (g)	
	Shoot	Root	Shoot	Root
MS-1	80.81 a	5.79 b	2.91 a	0.27 a
MS-2	79.61 a	8.02 a	3.04 a	0.36 a
DFT	45.31 c	7.50 ab	1.90 b	0.37 a
NFT	66.78 b	7.39 ab	2.04 b	0.30 a

^z MS-1=mist spray with pumping during 15 min/15 min (on/off); MS-2=mist spray with pumping 2 min/ 2min (on/off); DFT=water table about 5cm deep; NFT=water table below 1cm deep.

^y Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

Table 3-108는 최종 수확시 상추의 엽록소 함량을 나타낸 것이다. 엽록소 a, b의 함량은 시스템에 따라 유의적으로 나타났는데, 담액수경보다는 분무수경에서 월등히 높게 나타나 전체적인 생육에 상응하는 결과를 보였다. 즉 분무수경에서는 엽록소 함량이 높아 지상부 생육이 좋았던 것으로 생각되며, 이러한 생육의 차이는 담액수경보다 분무수경에서 근권부 온도가 높게 형성되어 생육에 다소 유리하

게 작용하였을 것이며, 특히 분무수경에서는 공기와 접하는 기회가 많아 뿌리의 성장에 필요한 산소가 원활히 공급되었던 것으로 생각된다. 이런 관점에서 볼 때 분무수경이 담액수경보다는 생육이 월등한 것으로 생각되며, 산소와 양액이 원활히 공급되는 박막수경에서도 생육이 좋은 것으로 나타났다.

Table 3-108. The effects of culture system on chlorophyll content of lettuce at harvest.

System ^z	Chlorophyll content (mg/l)		
	a	b	total
MS-1	0.453 a ^y	0.338 a	0.791 a
MS-2	0.455 a	0.351 a	0.806 a
DFT	0.370 b	0.278 b	0.649 b
NFT	0.376 b	0.279 b	0.655 b

^z MS-1=mist spray with pumping during 15 min/15 min (on/off); MS-2=mist spray with pumping 2 min/ 2min (on/off); DFT=water table about 5cm deep; NFT=water table below 1cm deep.

^y Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

Table 3-109은 수확시 상추의 체내 무기물 함량을 나타낸 것이다. 전질소와 K^+ 은 시스템에 따른 유의적인 차이를 보이지 않았으나 K^+ 의 경우 담액처리에서 약간 높은 경향을 보였다. 그러나 Ca^{2+} 는 담액처리에서 오히려 낮아지는 결과를 보였고, Mg^{2+} 는 담액수경과 15분 간격 분무경에서 유의적으로 낮았다.

이러한 사실은 근권부의 수분환경이 달라짐에 따라 각 이온에 대한 뿌리의 흡수양상이 변화하고 작물의 생육이 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 근권부의 효율적인 관리가 작물 생산에 절대적으로 중요하며, 저비용으로 각 작물에 적합한 환경을 조성하는 시스템 개발이 필요한 것으로 생각된다.

Table 3-109. The mineral content of lettuce grown by different culturing system at harvest.

System ^z	T-N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	mg/g (dry weight basis)			
MS-1	28.01 a ^z	55.84 a	11.17 a	3.12 a
MS-2	29.04 a	58.50 a	10.60 a	2.70 b
DFT	28.02 a	61.40 a	9.12 b	2.81 ab
NFT	28.55 a	55.38 a	10.33 a	3.11 a

^z Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

3) 각 재배 시스템에 따른 시금치의 생육반응

다음 Fig. 3-74은 시금치 재배기간 중 양액의 pH와 EC의 변화를 나타낸 것이다. 생육진반에 있어서 pH는 대체로 비슷한 변화양상을 보였는데 생육 초기에 증감을 반복하지만 약간씩 감소하는 경향이었고, 생육 중반 이후로 다시 증가하여 수확기에는 분무수경에서는 7.3까지 증가하였다.

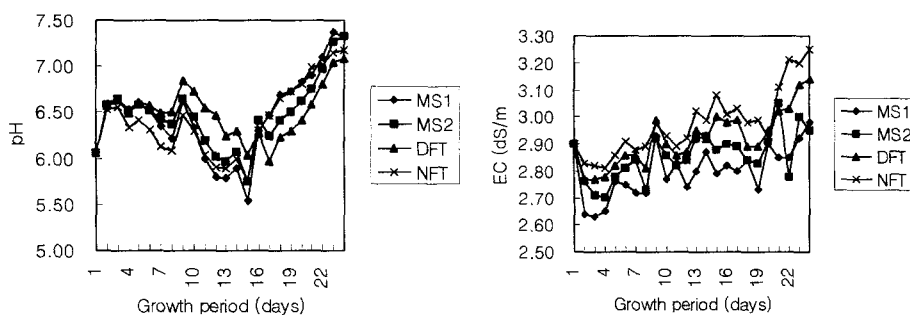


Fig. 3-74. The change of pH and EC of nutrient solutions in mist spray, NFT and DFT during spinach culture.

생육전기에는 다른 처리보다 박막수경에서 약간 낮았으나, 생육 후기에는 담액수경에서 증가하는 폭이 적었다. 이는 뿌리가 양액에 고루 접촉하여 양수분 흡수가 일정한 비율로 이뤄진 것으로 생각되며 이러한 pH의 변화는 상추와 마찬가지로 암모니아태질소 흡수에 뒤이은 질산태질소의 흡수에 기인한 것으로 생각된다.

EC의 변화에 있어서는 생육중기까지 15분 간격 분무수경과 담액수경에서 양수분 흡수가 균일하게 나타났던 것으로 생각되나, 생육후기에 양분의 흡수보다 수분의 증발산이 많이 발생하여 EC가 다소 높게 나타났다. 특히 박막수경과 담액수경에서 그 경향이 뚜렷하여 잎의 분화보다는 생장이 활발하게 이루어져 수분흡수가 많았던 것으로 생각된다.

재배기간중 양액과 근권부 온도의 평균적인 일중 변화는 Fig. 3-75에 나타낸 바와 같다.

상추에서와 마찬가지로 담액과 박막수경보다는 분무수경에서 온도가 2~3℃ 높게 나타났으며, 기온에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 분무간격에 있어서는 15분보다 2분 간격으로 분무한 것이 더 높게 나타나 양액이 공기와 접하는 빈도가 많을수록 외기의 영향을 많이 받는 것으로 생각된다. 박막수경과 담액수경을 비교하면 수위가 높은 담액수경에서 온도가 더 낮게 유지가 되었다.

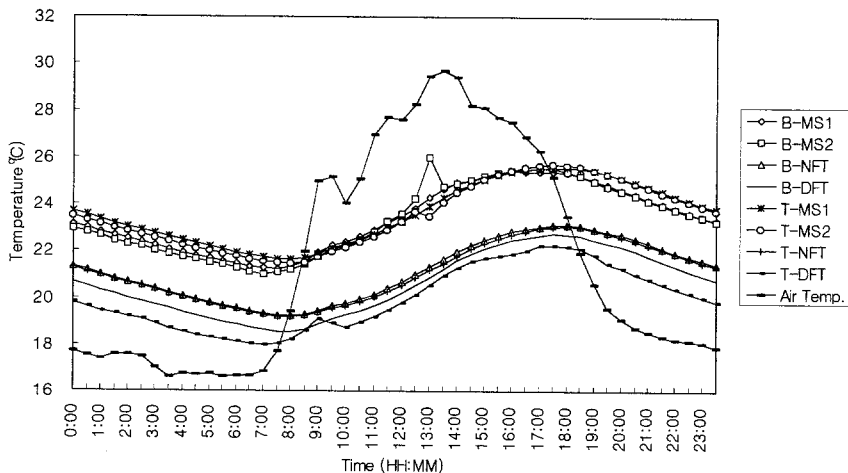


Fig. 3-75. The Fluctuation of diurnal mean temperature of air, rhizosphere and nutrient solution changed culture system. In legends, B is bed and T is tank.

Table 3-110는 수확시 시스템에 따른 시금치의 생육양상을 나타낸 것이다.

초장은 2분 간격 분무수경에서 가장 컸고, 담액수경에서 가장 작았다. 유의적인 차이는 없었지만 엽수나 엽장도 비슷한 결과를 보였으며, 엽폭에 있어서는 유의적인 차이를 나타냈다. 시스템에 따라 근장은 크게 영향을 받지 않은 것으로 나타났으며, 총 엽면적에 있어서는 2분 간격으로 분무수경한 것이 가장 넓게 나타나 광합성이 활발하게 이뤄졌던 것으로 생각된다.

지상부 생체중은 시스템에 따른 영향이 극명하게 나타났는데, 2분 간격 분무수경에서 가장 무거웠으며 NFT, 15분 간격 분무수경, DFT순으로 무거웠다. 그러나 지하부 생체중과 건물중은 처리간에 유의적인 차이를 보이지 않았으며, 다만 지상부 건물중에 있어서 생체중과 유사한 결과를 보여 2분 간격 분무수경에서 건물물이 높고 생육이 가장 우수하였던 것으로 생각된다.

Table 3-110. The effects of culture system on spinach(*Spinacia oleracea* L.) growth at harvest.

System ^z	Plant length	No. of	Leaf length	Leaf width	Root length
	(cm)	leaves	(cm)	(cm)	(cm)
MS-1	38.28 a ^y	23.5 a	17.80 a	14.83 a	51.93 a
MS-2	33.53 bc	21.3 a	15.42 a	13.30 ab	58.75 a
DFT	32.02 c	20.8 a	15.37 a	12.35 b	51.37 a
NFT	35.45 ab	22.3 a	17.45 a	13.77 ab	51.67 a

	Total leaf area (cm ²)	Fresh weight (g)		Dry weight (g)	
		Shoot	Root	Shoot	Root
MS-1	2197.1 a	122.82 a	12.33 a	6.51 a	0.89 a
MS-2	1140.7 b	83.95 c	12.82 a	4.35 b	0.92 a
DFT	1082.7 b	81.37 c	14.13 a	4.83 b	0.92 a
NFT	1463.9 b	103.12 b	14.97 a	7.52 a	1.06 a

^z MS-1=mist spray with pumping during 15 min/15 min (on/off); MS-2=mist spray with pumping 2 min/ 2min (on/off); DFT=water table about 5cm deep; NFT=water table below 1cm deep.

^y Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

Table 3-111. The effects of culture system on chlorophyll content of spinach at harvest.

System ^z	Chlorophyll content (mg/l)		
	a	b	Total
MS-1	0.678 a ^y	0.431 a	1.109 a
MS-2	0.763 a	0.490 a	1.252 a
DFT	0.683 a	0.433 a	1.116 a
NFT	0.752 a	0.478 a	1.230 a

^z MS-1=mist spray with pumping during 15 min/15 min (on/off); MS-2=mist spray with pumping 2 min/ 2min (on/off); DFT=water table about 5cm deep; NFT=water table below 1cm deep.

^y Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

Table 3-111은 시금치 수확시 엽중 엽록소 함량을 나타낸 것이다. 처리간에 큰 유의성은 없었지만 15분 간격 분무수경과 NFT 시스템에서 다소 높게 나타나 생육이 지연되는 만큼 단위 무게당 엽육 조직내 엽록소 함량이 높았던 것으로 생각된다.

Table 3-112. The mineral content of spinach grown by different culturing system at harvest.

System ^z	T-N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	mg/g (dry weight basis)			
MS-1	32.11 a ^z	95.06 a	4.98 b	11.39 ab
MS-2	31.31 a	87.41 a	6.46 a	11.62 ab
DFT	31.62 a	84.64 a	4.93 b	11.98 a
NFT	31.98 a	69.63 b	4.88 b	10.20 b

^z Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

Table 3-112는 수확시 시금치의 무기물 함량을 나타낸 것인데, 전질소에 있어서는 처리간 유의적인 차이를 보이지 않았으며 K^+ 함량은 박막수경에서 유의적으로 낮은 결과를 보였다. 반면 칼슘은 15분 간격 분무수경을 제외한 나머지 처리구에서 낮았으며, 마그네슘은 박막수경에서 유의적으로 낮아 상추와는 다른 결과를 나타냈다. 이는 작물마다 각 이온별 흡수 양상이 다르기 때문으로 생각된다.

4) 각 재배 시스템에 따른 미나리의 생육반응

재배기간중 pH와 EC의 변화(Fig. 3-76)를 보면, 대체로 모든 처리구의 pH가 생육중반까지 유사하게 감소하다 증가하는 경향을 보였으나 생육 후반에 처리간에 차이가 나타나 박막수경에서 높아지는 경향이였다. 이러한 양상은 상추와 시금치를 비롯하여 암모니아질소를 우선적으로 흡수하는 엽채류에서 나타나는 것으로 양이온인 암모니아태질소를 흡수하게 되면 뿌리세포 내에서 proton이 방출되어 근권부의 pH가 저하하게 된다.

EC는 EC와 마찬가지로의 경향을 보여 생육 후기에 분무수경에서 비교적 완만한 감소를 보이지만 담액과 박막수경에서는 다소 급격한 감소를 보였다. 이러한 EC 변화는 외부환경에 영향을 많이 받아 광도가 적당하고, 기온이 생육조건에 부합하면 왕성한 생육을 하게 되고 따라서 양분흡수량이 많아지며, 흐리거나 부적합한 온도범위에서는 생육이 더디어 EC와 pH가 증감을 반복하는 양상을 띠는 것으로 생각된다.

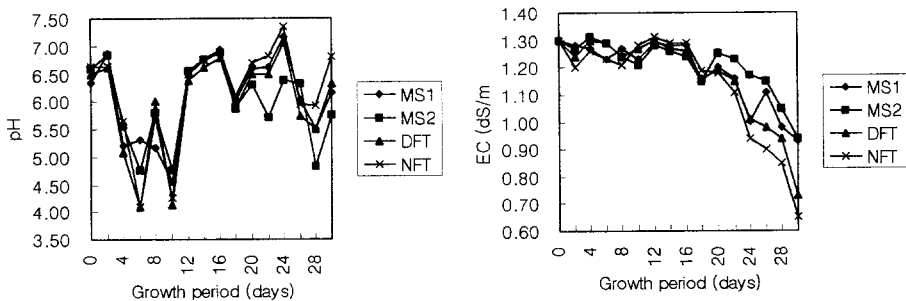


Fig. 3-76. The change of pH and EC of nutrient solutions in mist spray, NFT and DFT during water dropwort culture.

Fig. 3-77은 재배기간 중 기온, 근권부 및 양액 온도의 평균적인 일변화를 나타낸 것인데, 주간에 대기의 온도가 증가함에 따라 점차 올라가다 오후 2시경을 최고로 다시 온도가 저하하는 양상을 보이는데, 양액이나 근권부의 온도는 대기보다 약 4시간 늦게 최고점에 오르다가 다시 기온이 저하함에 따라 액온과 근권부 온도도 다시 감소하여 이튿날 아침 8시 30분경에 최저온도를 나타내었다.

시스템별로 살펴보면 2분 간격으로 분무한 시스템에서 온도가 가장 높게 유지되었고, 다음으로 15분 간격 분무수경에서 높게 나타났다. 반면 담액수경이나 박막수경 간에 온도차가 거의 없이 비슷한 양상이었다.

그리고 앞서 실험과 마찬가지로 시스템별로 온도차이가 심하게 나타났는데, 2분 간격 분무수경보다 15분 간격 분무수경에서 2°C 정도 낮았고, 이보다 박막, 담액수경에서 2~3°C 낮아 결과적으로 2분 간격 분무수경과 박막수경간에는 약 4°C 이상의 온도차가 발생하였다. 겨울에는 분무수경에서 대기보다 조금 높게 형성된 근권부 온도에 따라 생장이 유리하게 이루어질 것으로 예상되나, 봄에서 여름으로 가는 시기에는 이런 고온이 상당히 불리할 것으로 생각된다.

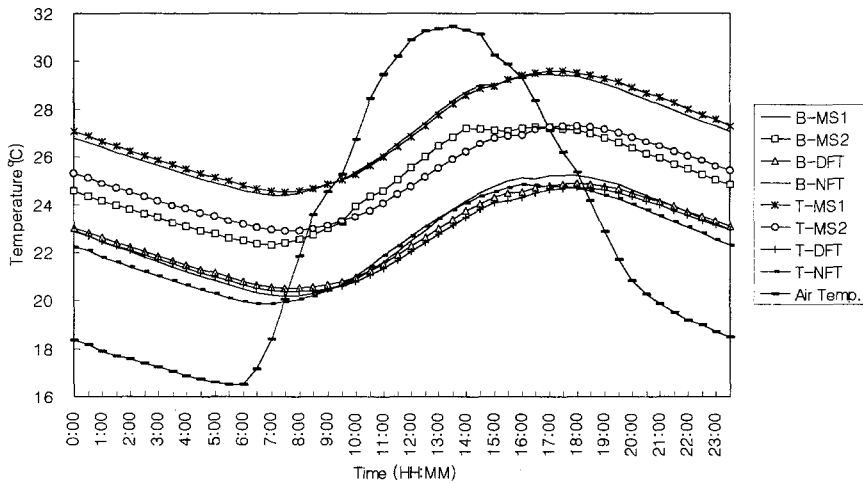


Fig. 3-77. The Fluctuation of diurnal mean temperature of air, rhyzosphere and nutrient solution changed culture system. In legends, B is bed and T is tank.

Table 3-113과 3-135은 최종 수확시 각 시스템에 따른 미나리 생육과 엽내 엽록소 함량을 나타낸 것이다.

전반적으로 보면 2분 간격 분무수경에서 지상부 생육이 원활하게 이루어진 것으로 나타났는데, 같은 분무수경에서도 15분 간격에서는 생육이 불량하였다. 엽수와 주근장의 길이에 있어서 담액수경시 다른 처리구보다 많거나 길게 나타났으며, 특히 뿌리의 부피에 있어서는 지상부 생육과 상이하게 박막이나 담액수경보다 15분 간격 분무수경에서 많이 나타났다. 그러나 총엽면적은 2분 간격 분무수경에서 가장 넓게 나타나 생육이 왕성하게 이루어졌다. 이는 지상부와 지하부 생체중에서도 비슷한 경향을 보여 광합성에 가장 크게 영향을 미친 것으로 생각된다.

Table 3-113. The effects of culture system on water dropwort(*Oenanthe stolonifera* DC.) growth at harvest.

System ^z	Plant length	No. of	No. of	Runner	No. of
	(cm)	leaves	runner	length (cm)	internodes
MS-1	50.28 a ^y	6.17 ab	9.17 a	59.73 a	7.50 a
MS-2	44.00 b	5.83 b	8.50 a	48.07 b	7.33 a
DFT	50.53 a	6.83 a	9.00 a	64.88 a	7.83 a
NFT	50.98 a	6.33 ab	8.33 a	59.20 a	7.83 a

	Root length	Root volume	Total leaf	Fresh weight (g)	
	(cm)	(ml)	area (cm ²)	shoot	root
MS-1	37.42 b	19.70 a	2147.5 a	121.79 a	17.17 a
MS-2	41.72 ab	15.42 ab	1280.6 b	74.87 c	13.58 ab
DFT	47.88 a	14.10 b	1631.3 ab	111.45 ab	12.10 b
NFT	45.00 ab	14.80 b	1447.3 b	94.78 b	12.59 b

^z MS-1=mist spray with pumping during 15 min/15 min (on/off); MS-2=mist spray with pumping 2 min/ 2min (on/off); DFT=water table about 5cm deep; NFT=water table below 1cm deep.

^y Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

엽록소 함량에서도 위의 결과와 유사하게 나타났는데, 엽록소 a는 박막수경에서 가장 낮게 나타난 반면, b는 2분 간격 분무수경에서 가장 나타났다. 총엽록소 함량은 생육이 좋았던 2분 간격 분무수경에서 가장 낮게 나타났는데, 생육이 왕성해

집에 따라 엽육조직이 두터워지기 전에 잎이 급속히 신장하여 단위 면적당, 단위 무게당 엽록소 함량은 더 적게 함유되어 있는 것으로 생각된다.

Table 3-114. The effects of culture system on chlorophyll content of water dropwort at harvest.

System ^z	Chlorophyll content (mg/l)		
	a	b	Total
MS-1	1.201 a ^y	0.160 b	1.361 b
MS-2	1.051 bc	0.403 a	1.454 a
DFT	1.142 ab	0.335 a	1.477 a
NFT	1.010 c	0.398 a	1.408 ab

^z MS-1=mist spray with pumping during 15 min/15 min (on/off); MS-2=mist spray with pumping 2 min/ 2min (on/off); DFT=water table about 5cm deep; NFT=water table below 1cm deep.

^y Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

Table 3-115는 수확시 무기물 함량을 나타낸 것이다.

상추와 시금치에 있어서는 전질소 함량이 시스템에 따라 큰 영향이 없었으나 미나리의 경우 15분 간격 분무수경에서 현저하게 낮게 나타났으며, 양액 공급이 원활하고 산소조건이 양호한 2분 간격 분무수경과 박막수경에서 높게 나타났다. 반면 K^+ 과 Mg^{2+} 함량은 박막수경에서 가장 낮았으며 Ca^{2+} 함량에 있어서는 유의적인 차이를 보이지 않았다.

Table 3-115. The mineral content of water dropwort grown by different culturing system at harvest.

System ^z	T-N	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	(mg/g in dry weight basis)			
MS-1	36.39 a ^z	60.02 ab	12.68 a	2.36 a
MS-2	33.16 b	60.97 a	12.61 a	2.22 ab
DFT	34.89 ab	57.23 ab	14.45 a	2.25 ab
NFT	36.94 a	55.60 b	12.25 a	2.13 b

^z Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

나. 생육단계별 재배시스템 변경에 따른 작물의 생육

1) 생육단계별 재배시스템 변경에 따른 상추의 생육

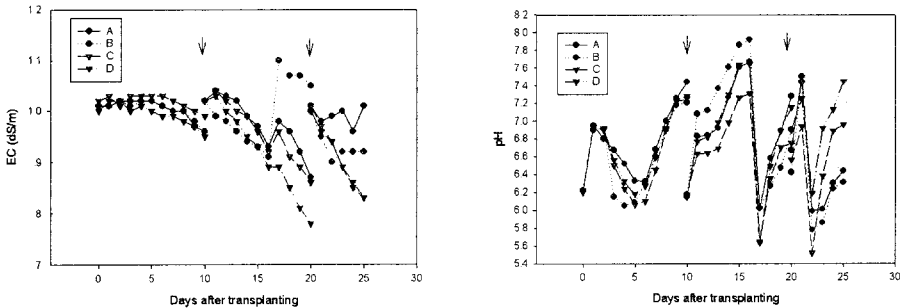


Fig. 3-78. The pH and EC fluctuation of nutrient solution while lettuce was cultured in different system as grows. The nutrient solution was entirely renewed at arrow point. In legends, A; DFT→NFT→aeroponics, B; DFT→aeroponics, C; DFT→NFT, D; DFT(control).

각 생육단계별로 재배시스템을 달리하여 상추를 재배하였을 경우의 양액의 pH와 EC를 Fig. 3-78에 나타내었다.

일반적으로 생육 초기 이후 양액을 갱신하면 생육일수에 따라 증가하여 초기 pH보다 1이상 상회하였지만 갱신전에 급격히 감소하다 다시 증가하는 N자 곡선을 보였다. 생육후기에 이러한 pH 변화는 담액수경에서 약간 높게 나타났고 A, B 처리구에서 약간 완만하였다.

생육초기에는 양수분흡수량이 상대적으로 적기 때문에 EC의 변화 폭은 크지 않았으나 생육이 진전되면 약간씩 감소하는 경향을 보였다. 다만 생육중기에 담액수경에서 분무경으로 옮겨 재배한 B 처리구에서 약간 높아지는 경향을 보였다. 그리고 정식 20일째 이후 EC는 근권부를 점차 대기에 노출시키는 A 처리구에서 어느 정도 일정한 경향을 보였지만 다른 처리구에서는 변화가 심하게 나타났고 특히 담액수경에서는 EC의 감소폭이 크게 나타났다.

수확시 각 처리별 생육양상(Table 3-116)을 보면 엽수, 엽폭 및 지상부 생체중에서는 처리간에 유의적인 변화를 보이지 않았으나 담액에서 박막수경으로 옮겨 준 경우에 약간 높은 경향을 보였다. 엽장에서는 근권부에 양액이 계속적으로 접촉이 되는 C와 D에서 유의적으로 길었고, 근장에 있어서는 담액수경후 바로 분무경으로 옮긴 B 처리구에서 가장 길게 나타났다. 반면 단계적으로 뿌리를 대기에 노출시키는 A 처리구에서 주근장이 가장 짧게 나타났으며, 대조구인 담액으로 계속 재배한 경우에도 길지 않은 결과를 보였다.

지하부 생체중과 건물중은 생육 중기에 바로 대기에 노출시키는 B 처리구와 담액후 박막재배한 C 처리구에서 가장 높게 나타났고 건물물은 오히려 B 처리구에서 감소하는 경향을 보였다.

Table 3-116. The growth characteristics of lettuce grown by different culture system at harvest.

Culture system ^z	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Root length (cm)	Fresh weight (g)		Dry weight (g)	
					leaf	root	leaf	root
A	33.5 a ^y	30.2 b	17.6 a	26.13 c	127.3 a	13.53 bc	9.17 a	0.81 ab
B	33.3 a	29.3 b	17.9 a	39.06 a	114.7 a	18.87 a	6.22 b	1.02 a
C	34.6 a	33.1 a	18.4 a	30.19 b	141.4 a	17.25 ab	8.71 a ^l	0.90 a
D	32.3 a	32.5 a	16.7 a	26.69 bc	144.3 a	12.08 c	12.95 a	0.66 b

^z A; DFT→NFT→aeroponics, B; DFT→aeroponics, C; DFT→NFT, D; DFT(control).

^y Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

생육단계별 지상부와 지하부의 생체중 및 건물중 변화를 Fig. 3-79에 나타내었다.

생체중과 건물중에 있어서 일반적으로 엽채류인 상추는 초기 생장이 약간 완만하다 중기 이후에 급속한 증가를 보이는 전형적인 S자 생장곡선을 보이고 있다. 생육초 10일째까지는 15g 미만이던 지상부 생체중이 20일째 90g 이상으로 증가하고 25일째에는 150g까지 증가하였다. 지상부 건물중에서도 10일째 1g 미만이었으나 20일째 DFT→NFT→aeroponic culture를 제외한 세처리 모두 4g 이상 증가하였으며, 25일째에는 8g 정도였다.

생육 단계별 재배시스템에 따른 생육차이는 지상부 생체중에서 20일까지는 영향이 나타나지 않았으나 25일째에는 지하부 생체중에서 약간씩 처리에 대한 영향이 나타나고 있다. 건물중에서도 생육 20일째부터 처리간 유의적인 차이를 보여 25일째에는 뚜렷하게 나타나 B(DFT→aeroponic)와 C(DFT→NFT) 처리에서 건물중이 가장 높았고, A(DFT→NFT→aeroponic)와 D(DFT)에서 수분함량이 가장 높아 건물중은 감소하였다.

Table 3-117에 각 단계별 n/w 값을 나타내었다.

질산태질소는 생육초기에 8.4~9.27 me/L였으나 생육중기에 11.02~13.95me/L로 증가하였다. 생육후기에는 시스템에 따라 약간씩 다르게 나타나 A에서 5.97인 반면 D(담액수경)에서는 가장 높아 15.67me/L로 나타났다. 그러나 암모니아태 질소는 생육초기보다 생육중기에 약간 낮아지다 생육후기에 다시 증가하는 경향을 보

었다.

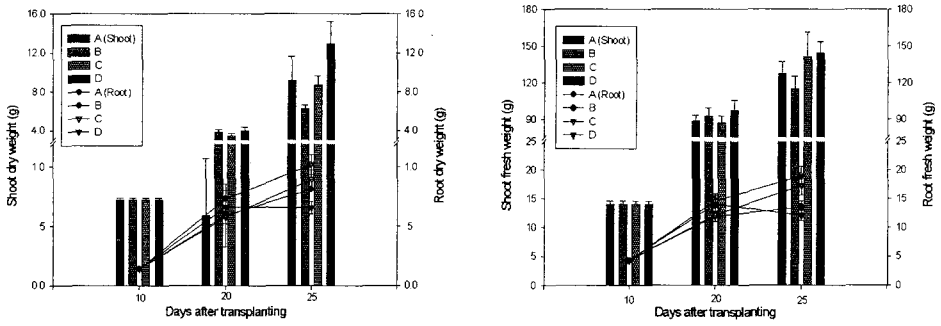


Fig. 3-79. Fresh and dry weight changes of lettuce when altering the culture system as to growth stage.

Table 3-117. Calculated n/w values of lettuce based on Yamazaki fomular when altering cultrue system at each growth period.

Growth period (days)	Culture system	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
10	A	8.69	2.80	5.88	7.47	3.21	0.12
	B	8.40	2.95	5.46	7.91	2.83	0.23
	C	9.18	2.87	5.77	6.83	3.18	0.06
	D	9.27	3.34	6.15	8.37	2.63	0.01
20	A	12.45	1.52	4.41	8.99	1.41	0.14
	B	11.02	1.34	3.88	7.65	1.78	0.27
	C	11.98	1.50	4.34	8.63	1.67	0.20
	D	13.95	1.51	4.48	9.50	1.85	0.21
25	A	5.97	2.42	4.55	7.33	2.37	0.12
	B	8.24	2.25	5.95	8.33	3.13	0.44
	C	10.97	1.77	4.54	8.11	2.50	0.55
	D	15.67	3.41	8.33	14.06	3.13	0.22

인산의 경우 생육전반에 걸쳐 비슷한 경향을 보였으며 K⁺은 시스템에 따라 다양하게 나타났다. Ca²⁺은 10일까지 요구도가 높다가 생육 중기인 20일째에는 약간 감소하였다. 그러나 생육이 왕성하게 일어나는 생육중기 이후에 다시 증가하는 경향을 보였다.

2) 생육단계별 재배시스템 변경에 따른 미나리의 생육

Fig. 3-80은 미나리 재배기간 동안 양액의 pH와 EC의 변화이다.

pH는 생육초기에 완만한 N자 형태를 보이며 변하다가 양액 갱신이후 급격하게 감소하였다. 그 경향은 A(DFT→NFT→aeroponic)와 D(DFT)에서 심하게 나타났고 B(DFT→aeroponic)에서 완만한 경사를 보였다. 생육후기에는 약간 감소하다 다시 증가하는 추세를 보였는데, 일반적으로 양액의 pH가 감소하는 원인은 특정 양이온의 과도한 흡수에 의한 양분간의 불균형에 기인하는 것으로 알려져 있다.

특히 질소원 중에서 암모니아태질소를 우선적으로 흡수하는 경우에는 일시적으로 pH가 감소하며, 상추와 미나리는 pH 조건과 무관하게 암모니아태질소를 우선적으로 흡수하기 때문에 생육후기에 소량으로 존재하는 암모니아태질소를 흡수하면서 pH가 감소하다 질산태질소를 흡수하기 시작하면서 pH가 증가하는 것으로 생각된다.

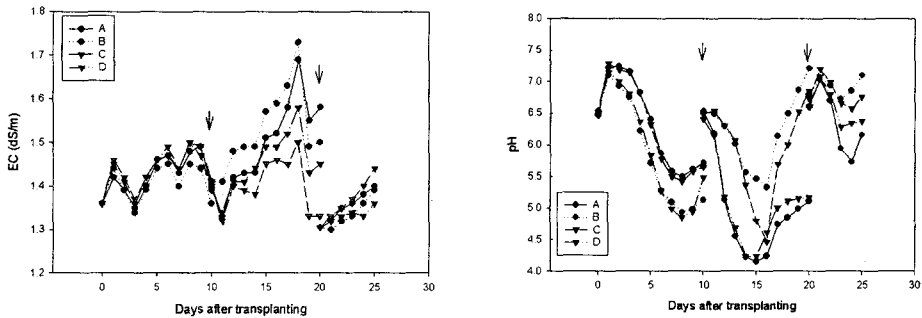


Fig 3-80. The pH and EC fluctuation of nutrient solution while water dropwort was cultured in different system as grows. The nutrient solution was entirely renewed at arrow point. In legends, A; DFT→NFT→aeroponics, B; DFT→aeroponics, C; DFT→NFT, D; DFT(control).

Table 3-118. The growth characteristics of water dropwort grown by different culture system at harvest.

Culture system ^z	Plant height (cm)	2nd Leaf length (cm)	No. of leaves	Root length (cm)	Fresh weight (g)		Dry weight (g)	
					shoot	root	shoot	root
A	39.18 a ^y	23.95 ab	6.38 a	32.26 a	54.21 a	10.04 a	4.44 a	0.49 a
B	41.24 ab	21.28 b	6.50 a	29.11 a	51.33 a	9.93 a	4.31 a	0.44 a
C	39.11 ab	21.84 ab	6.50 a	28.13 a	46.57 a	8.34 a	3.86 a	0.39 a
D	37.40 b	25.15 a	6.38 a	31.16 a	57.12 a	10.70 a	4.78 a	0.54 a

^z A; DFT→NFT→aeroponics, B; DFT→aeroponics, C; DFT→NFT, D; DFT(control).

^y Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

수확시의 미나리 생육(Table 3-118)을 보면 초장에서 뿌리를 단계적으로 공기에 노출시키는 시스템 변경에서 가장 높게 나타났고, 담액식으로 계속 재배한 대조구에서 유의적으로 작게 나타났다. 제2신엽장은 대조구에서 오히려 컸으며 엽수나 생체중 및 건물중에서는 유의적인 차이가 없었지만 DFT→NFT→aeroponic 처리구와 담액재배에서 약간 높은 경향을 보였다.

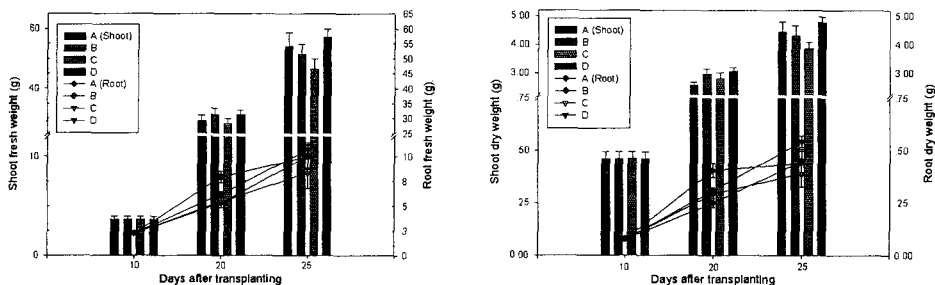


Fig. 3-81. Fresh and dry weight changes of water dropwort when altering the culture system as to growth stage.

생육단계에 따른 근권부 수분조건을 달리하였을 때 생체중과 건물중 변화를 Fig. 3-81에 나타내었다.

지상부 생체중에서는 20일째까지 유의적인 변화를 보이지 않았으나 C(DFT→NFT) 처리구에서 조금씩 감소하기 시작하여 25일째에 다른 처리에 비해 약간 낮아졌다. 그러나 지하부 생체중은 담액에서 10일째 바로 분무경으로 옮긴 처리구에서 약간 높았지만 이후 그 효과가 상쇄되었다.

건물중에서도 생체중과 유사한 경향을 보였는데, 20일째 DFT→NFT 처리구에서 약간 생육이 저조하여 25일째 뚜렷하게 나타났다. 이것은 생육초기에 생장량이 적기 때문에 뿌리에서의 산소소비량이 적어 용존산소가 부족하지 않지만 특히 생육이 왕성한 20일 전후로 많은 용존산소를 필요로 하게 된다. 따라서 대조구나 10일째 분무수경시스템으로 변경한 처리구에서는 생육이 원만하게 이루어졌으나 NFT로 변경하게 되면 용존산소가 부족하게 되어 근권부 생육에 지장을 초래하는 것으로 생각된다.

Table 3-119에 각 단계별로 미나리 양액소모량과 양액의 원소별 함량을 계산하여 n/w 값을 나타내었다.

10일째 질산태질소의 당량은 8.57~10.07me/L로 상당히 높았으며 20일째 7.9me/L로 약간 감소하다가 C 처리구를 제외한 다른 처리구에서 4 me/L 정도로 감소하였다. 암모니아태질소와 인산은 생육중기에 약간 감소하다 생육후기에 다시 증가하였으며, K^+ , Ca^{2+} 및 Mg^{2+} 은 비슷한 요구량을 보였다.

Table 3-119. Calculated n/w values of water dropwort based on Yamazaki fomular when altering cultrue system at each growth period.

Growth period (days)	Culture system	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	(me/L)		
					K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
10	A	8.57	1.08	3.01	7.77	0.84	1.40
	B	12.58	1.28	3.47	9.38	0.76	1.53
	C	9.89	1.11	3.15	8.03	0.90	1.42
	D	10.07	1.08	3.00	7.90	1.18	1.66
20	A	6.70	0.63	1.80	5.12	0.33	1.33
	B	5.88	0.55	2.59	6.22	1.19	1.90
	C	5.80	1.14	2.27	8.15	1.45	0.84
	D	5.33	0.98	1.97	6.50	0.91	1.03
25	A	4.32	1.01	2.02	7.41	0.89	1.10
	B	4.21	1.14	2.27	6.59	1.31	0.88
	C	9.09	1.09	2.17	6.30	1.04	1.40
	D	3.79	1.01	2.02	7.24	1.36	0.79

다. 생육단계별 액면저하에 따른 작물의 생육

1) 근권부의 유동적 액면저하에 따른 상추의 생육특성

NFT, DFT 및 유동적 액면저하에 따른 상추의 pH와 EC(Fig. 3-82)는 근권부의 수분조건과 상관없이 일정한 양상을 보였다. pH는 생육이 진전될수록 꾸준히 감소하다 14일째 전후에 다시증가하기 시작하였다. EC에 있어서도 생육초기 10일째

까지는 일정하게 유지를 하다가 이후 꾸준히 감소하는 경향을 보였다.

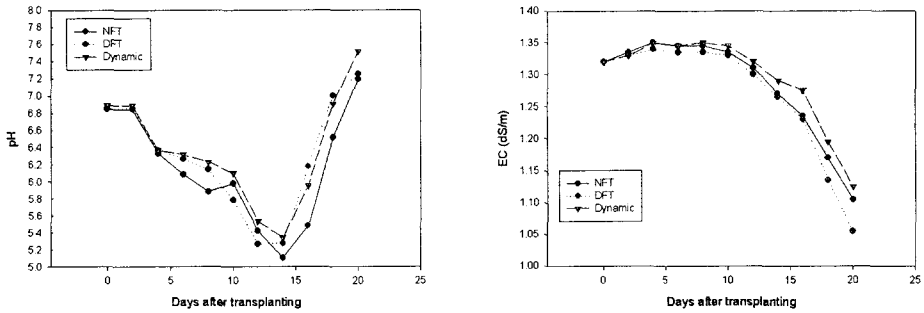


Fig. 3-82. The pH and EC changes of lettuce at each culturing system during growth.

정식후 10일째의 생육(Table 3-120)을 보면 전체적으로 재배방식에 따라 유의적인 차이는 없었지만 엽폭에서 DFT > Dynamic > NFT 순으로 감소하였다. 그리고 NFT보다 DFT에서 잎의 건물중이 유의적으로 높았으나 지하부 건물중에는 차이가 없었다.

20일째의 생육(Table 3-121)에서는 재배방식에 따라 그 효과가 크게 나타났는데, 엽수에서 유동적관리(Dynamic)에서 가장 많았고, 엽장 또한 길었다. 생체중 및 건물중에서도 유의적으로 높은 결과를 보인 반면 NFT에서는 가장 저조한 생육을 보였으며, DFT에서는 중간적인 결과를 보였다.

Table 4-120. The growth characteristics of lettuce following by culturing in different systems at 10 days after transplanting.

Systems ^z	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g)		Dry weight (g)	
				leaf	root	leaf	root
NFT	14.25 a ^y	16.56 a	8.34 b	11.10 a	2.61 a	0.61 b	0.30 a
DFT	15.38 a	17.60 a	9.31 a	14.18 a	3.06 a	0.78 a	0.31 a
Dynamic	15.25 a	17.30 a	9.10 a ^l	13.06 a	2.97 a	0.74 a ^l	0.27 a

^z Dynamic; nutrient solution level of bed was lowered by 2.5cm each 5 days after transplanting.

^y Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

Table 4-121. The growth characteristics of lettuce following by culturing in different systems at 20 days after transplanting.

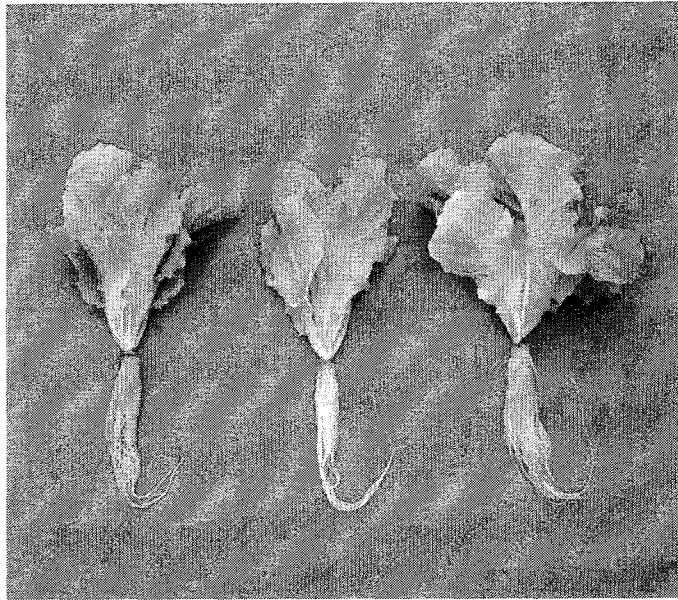
Systems ^z	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g)		Dry weight (g)	
				leaf	root	leaf	root
NFT	24.38 b ^y	26.71 b	15.80 b	90.08 b	14.40 b	3.68 b	0.75 b
DFT	25.75 a ^l	27.38 a ^l	16.94 a	111.86 a	17.13 b	4.86 a	0.84 b
Dynamic	26.50 a	27.85 a	17.73 a	124.73 a	21.76 a	5.37 a	1.07 a

^z Dynamic; nutrient solution level of bed was lowered by 2.5cm each 5 days after transplanting.

^y Duncan's multiple range test, $p=0.05$.

수확시의 상추의 근권부 생육양상을 보면 담액재배와 유동적 근권관리재배에서는 뿌리 색깔이 흰색으로 양호하고 그 생육도 건진하지만 NFT에서는 엉킴이 심하고 색도 약간 갈색을 띠어 산소부족 증상을 보였다. 최종 수확시 각 처리구에서의 상추 생육(Fig 4-83)에서도 DFT와 Dynamic 처리에서 지하부 생육이 원활하고 지상부 생육도 원활한 반면 NFT에서는 뿌리가 갈변하면서 지상부 생육도 억제되었다. 이러한 산소부족은 NFT 장기재배시 더욱 심화될 것으로 생각이 되며

근권부의 효율적인 산소공급이 이루어져야 할 것으로 생각된다.



(A) NFT (B) DFT (C) Dynamic

Fig. 3-83. The growth comparison of lettuce in different culture system at harvest.

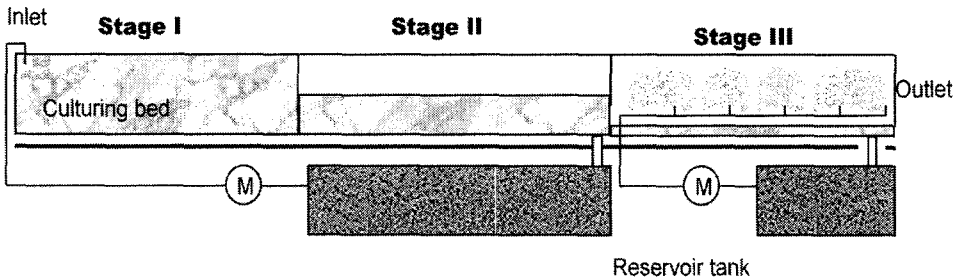


Fig. 3-84. Schematic diagram of dynamic lowering of solution level as to growing in hydroponic culture of leaf vegetable crops. DFT culture in Stage I, NFT culture in Stage II, and aero-hydroponics with nutrient solution conditioning in Stage III

Fig. 3-84는 경제적으로 엽채류를 생산하기 위한 근권부의 유동적 관리 시스템의 모식도인데, 생육초기에서 생육후기(수확단계)로 갈수록 베드를 점차 낮추어 가는 방식이다.

따라서 Fig. 3-84와 같이 뿌리 생육이 약한 생육초기(정식후 10일 전후, Stage I)에는 근권부에 양액이 충분히 공급될 수 있도록 DFT 형식으로 재배하다가 생육이 왕성하고 뿌리의 산소요구량이 커지면 Stage II와 같이 뿌리가 접하는 액면을 낮추어 대기중의 산소가 양액속으로 쉽게 녹을 수 있도록 하여야 할 것이다. 그리고 생육후기(Stage III)에는 박막식으로 필요한 만큼만 양액을 흡수할 수 있도록 하고 부족한 부분은 양액을 분무하여 보충하여 산소공급이 충분하게 공급될 수 있는 재배방식으로의 이동이 용이하게 이루어져야 수확과 포장이 원활할 것으로 생각된다.

라. 식물공장에 적합한 양액재배 시스템 및 배양액 종합관리 software개발

배양액내 이온 분석 수치에 따라 처방 및 보정용으로 개발된 프로그램의 실행은 Windows 95, WindowsNT 3.51K (Microsoft 사) 이상의 운영체제가 설치된 컴퓨터에서 작동이 가능하다. 프로그램 활용 범위를 개선하고자 상추 및 엽채류에 국한하지 않고 공인된 각종 유명 처방을 수집 정리하여 내장시켰다.

본 프로그램에서 사용할 수 있는 비료염은 양액재배에서 주로 사용되는 비료염을 중심으로 다량원소와 미량원소별로 구분하였다.

본 프로그램의 특성으로 자동계산과 사용자 계산이 가능한데, 자동 계산은 완전 자동 계산과 부분 자동 계산이 가능하지만, 계산 방식도 정확한 계산과 오차 범위 설정, 총 질소 개념등을 도입하여 다양한 설정이 가능하도록 하였다. 사용자 계산은 부분적 자동계산과 비료염과 성분 함량을 직접 비교해서 입력하는 완전 수동 계산 방식이 있다. 또한 비료염 종류와 배액률, 농도, 물량 등 세부 사항도 조절할 수 있어 사용자에게 맞게 배양액 처방 및 보정 작업이 가능하도록 하였다.

프로그램 개발에서 가장 중요한 순서도 부분으로는 계산과정이 이루어지는 흐름도인데, 계산방식과 비료염과 원소 성분량, 기준등을 종합적으로 고려하여 계산하는 자동 계산 흐름도에 중점을 두었다. (Fig. 3-85.)

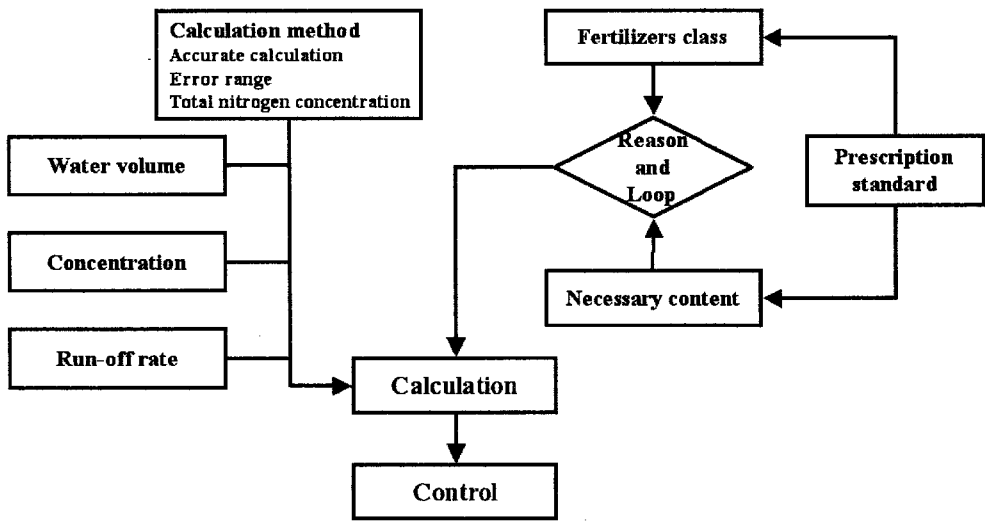


Fig. 3-85. Flow chart to several factor were had an effect on calculation.

흐름도 2차 개발에서는 계산이 시작되기 전에 계산 방식, 기준 물량, 배액률, 농도, 비료염 선택과 조합, 처방기준과 분석결과에 의한 실제 배양액내 첨가되어야 원소별 성분량이 고려되었다(Fig. 3-86).

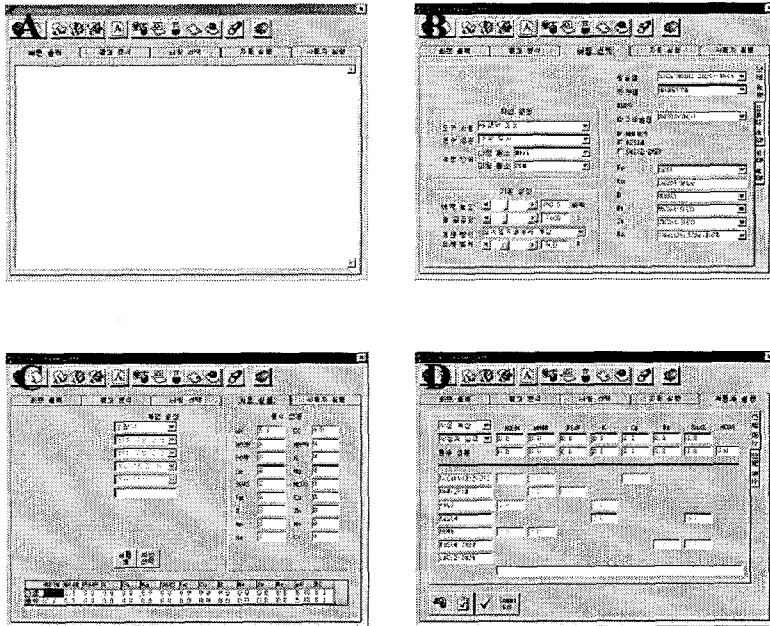


Fig. 3-86. An example of an interface screen used the part of Sookyoungee 2000: Calculation software for custom-mixed nursery fertilizers.

- A: Main document screen
- B: Basic setting screen
- C: Working screen
- D: User action screen

먼저 계산방식과 물량, 배액률, 원액의 농도를 기본 설정으로 공급하는 원액 탱크에 대한 조건을 변수로 설정하게 된다. 다음으로 처방기준과 분석결과를 비교하여 첨가되어야 할 원소별 성분량을 산출하고 선택된 비료염의 조합과 반복 비교하게 된다. 최종적으로 기본 설정과 원소별 성분량을 고려할 때 선택한 계산방식이 올바른가를 판단하고 적절한 계산식으로 분기하여 이온 보정 관계식을 산출하게 된다.

프로그램을 실행하게 되면 먼저 결과 출력 화면이 보이며, 결과 분석, 바탕설정, 자동계산, 사용자계산이 탭 화면으로 구성되어 있다.

결과 출력 화면은 계산 결과가 텍스트 박스에 출력되며, 결과 분석은 이온간의 비율과 길항성들을 구체적인 수치로 나타내어 계산 결과에 대해 상세한 정보를 서술한다. 바탕설정은 기본 설정과 보정 설정으로 나누어지는데, 기본 설정은 작업

의 선택, 비료염의 선택, 계산방식 등 조성과 보정에서 조성되는 원액의 농도 및 배액률 등과 같이 공통적으로 작용하는 세부사항을 설정하게 된다. 보정 설정은 주로 보정 작업시 조작하게 되는 것으로 이미 조제된 원액 탱크와 혼합탱크와 공급 탱크에 관한 세부사항을 입력한다. 자동계산은 바탕설정에서 조작된 환경 설정으로 조성 및 보정 계산 작업에 적합한 계산식을 판별하여 자동으로 수행한다. 따라서 사용자는 원수분석나 보정 작업시 공급탱크의 분석 결과를 입력하고, 처방기준과 작물, 재배 시스템등을 선택하면 된다. 사용자 계산은 원소별 성분량과 비료염의 조합 및 비율을 사용자가 계산과정에 따라 완전 수동이나 자동 계산으로 선택하여 수행할 수 있다.

모든 세부 사항을 선택한 이후 확인 버튼을 누르면 상단에 계산 버튼 아이콘에 연필 모양이 첨가되어 계산 시작을 알린다. 계산 출력은 우선 텍스트 화면에서 이루어지고, 보정 작업의 경우에는 원수 분석 결과와 기준, 첨가해야할 원액 탱크의 양이 다량원소는 리터(l), 미량원소는 밀리리터(ml)로 표시되어 출력된다. 사용자에게 따라 결과를 텍스트 파일, 엑세스 파일로 저장하거나 인쇄할 수 있다. 배양액 개발에 관련된 n/w 공식 마법사, 분자량 계산 마법사, 농도 변환 마법사, 단위 변환 마법사 등을 내장하고 있어 관련 작업이 용이하게 진행할 수 있다. 또한 본 프로그램에 없는 처방이 있는 경우 사용자 사전에 등록하면 언제든지 호출하여 사용할 수 있는 기능이 있으며, 출력된 텍스트 파일은 물론 데이터베이스 파일로 저장할 수 있어 자료를 효율적으로 보존 및 관리가 가능하다. 또한 상추 뿐만 아니라 다른 작물들도 배양액 처방 및 보정이 가능하도록 활용 폭을 넓혔다.

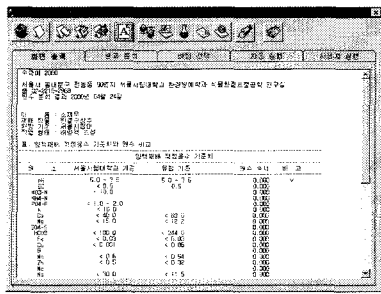
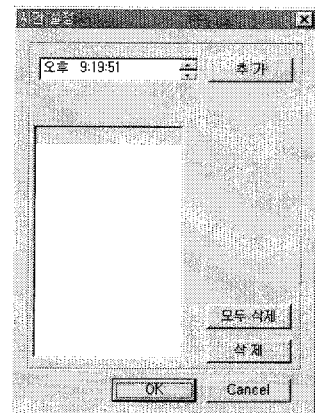
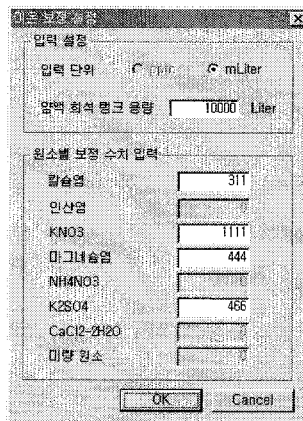
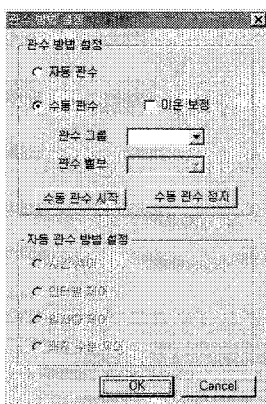
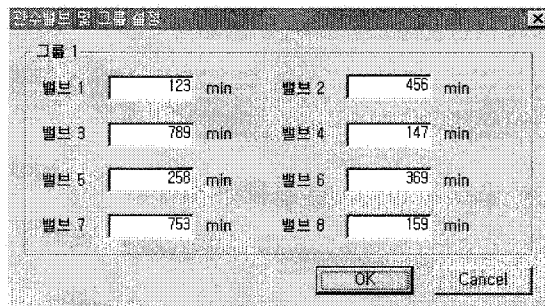
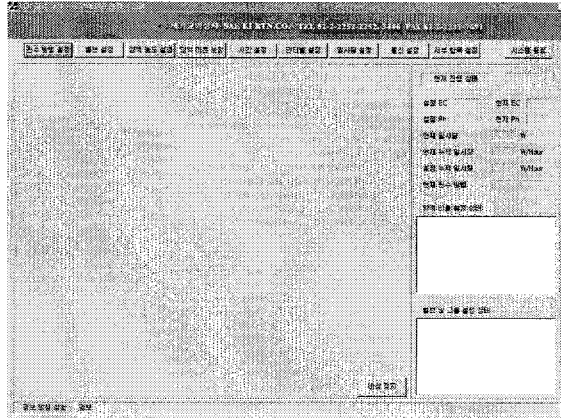
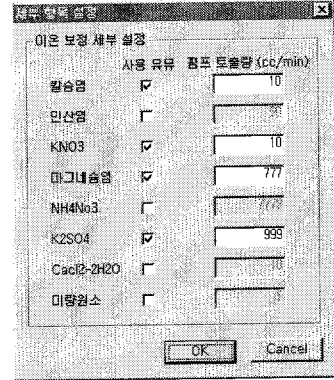
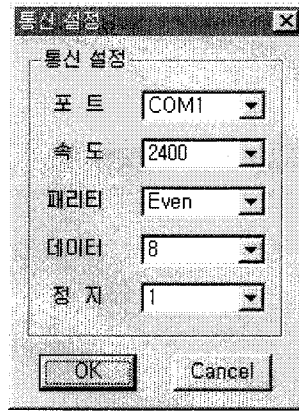
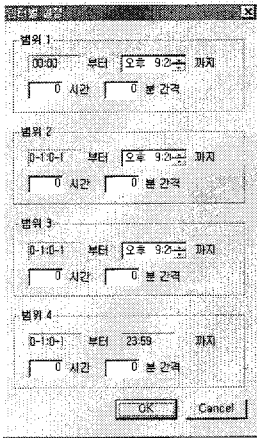


Fig. 3-87. An example of an interface screen used to select the result of Sookyoungee 2000: Calculation software for custom-mixed nursery fertilizers.

본 실험을 통해 순환식 재배 시스템의 배양액 이온 보정의 필요성과 효율성 및 경제성이 구명되었으며, 개발된 프로그램에 의해 이온 보정 작업이 정확하고 신속하게 이루어지는데 기여하였다.





3. 적요

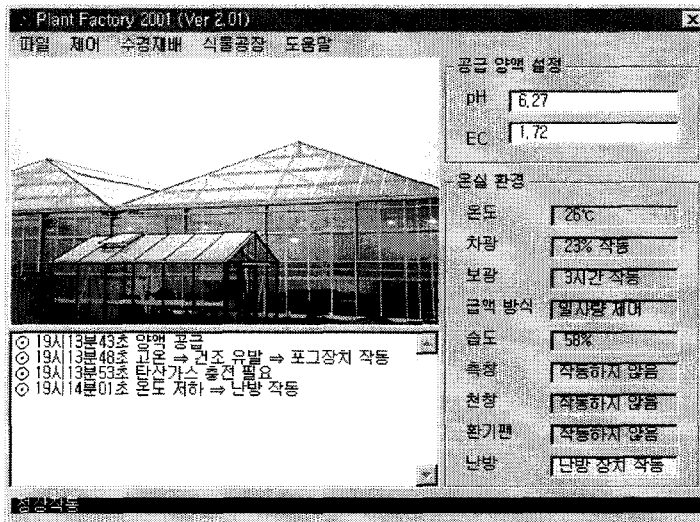
식물공장에서 채용가능한 수경재배시스템은 담액수경(DFT), 박막수경(NFT), 분무경(Aeroponic)등이라 할 수 있다. 이들 시스템간의 차이가 작물생육에 미치는 영향을 검토한 결과 수확기 상추 생육은 시스템간에서 분무경이 가장 높은 생육량을 나타냈으며, 다음으로 NFT였으며, DFT에서 낮게 나타났다. 배양액 용존산소 증대는 전체적으로 생육량 증가 효과가 뚜렷하였다.

생산시스템에 따른 작물의 생육을 보면 일반적으로 담액수경과 박막수경에 비해 분무경에서 베드 및 양액조 내 온도가 높았으며 근권부 호흡률이 증가하여 과다한 뿌리 생육이 억제되고 지상부 생육이 충실히 이루어진 것으로 생각된다. 분무경에 있어서 작물마다 분무간격에 따라 생육이 다소 다르게 나타났는데, 상추에 있어서는 생체중에 유의적인 차이가 나타나지 않았다. 시금치와 미나리의 경우 15분 간격 분무방식이 오히려 월등한 생육을 보여 지상부 및 지하부 생체중과 건물중이 유의적으로 증가하였다. 그러나 분무경은 초기 투자비가 많이 들고 정전등으로 인한 위험부담이 크므로 이를 대체하고 근권부에 산소를 원활하게 공급하는 경제적인 시스템 개발이 필요하다.

생육단계별로 재배시스템을 변경하였을 경우 상추의 생육은 정식시에 담액수경에서 분무수경이나 박막수경으로 베드를 옮겨주는 것이 양호하였다. 그리고 생육

단계에 따른 n/w 값은 위와 상이하게 시스템이 변경됨에 따라 다르게 나타났는데, 암모니아태질소와 인산태인 및 Ca은 생육초기에 높은 양분요구량을 보였으나 생육중기에는 약간 감소하였고 생육후기에 다시 증가하는 경향을 보였다. 미나리의 생육은 처리에 따라 유의적인 변화는 없었으나 n/w 값은 다르게 나타나 질산태질소는 꾸준히 감소하였고, 암모니아태질소와 인산태인 및 K은 생육중기에 낮은 요구량을 보였다.

이에 따라 상추와 미나리의 경우 생육단계에 따라 양액 조성을 달리 해주어야 하며, 특히 재배 시스템에 따라서 생육과 n/w 값이 크게 달랐는데 뿌리에 산소를 원활히 공급해 주어야 지상부 생육이 양호하게 이루어지며 이에 적절한 조성으로 양액을 공급해 주어야 할 것이다. 그리고 생육후기에 지상부 생육이 왕성해지면서 필요한 산소를 공급하기 위해선 생육초기에 담액식으로 이식상을 최소한으로 줄여 재배하면서 생육이 진전되면 점차 NFT 방식으로 이동하는 시스템이 가장 효율적일 것으로 생각된다. 베드를 3부분으로 나누어 Stage I에서는 담액식으로, Stage II에서는 배수구를 조절하여 DFT와 NFT를 절충하는 방식으로 재배하고 마지막 Stage III에서는 액면을 최대한 낮추면서 양액조정을 통하여 고품질 채소를 생산하는 것이 경제적이면서 재배와 수확이 용이한 재배방식으로 생각된다.



< 식물공장 재배식물의 배양액 종합관리 프로그램 초기 화면 >

제 4 장 식물공장용 재배식물의 생육 및 영양 진단 시스템 개발

제 1 절 식물공장내 재배식물의 생리장해 및 최적 영양상태 구명

1. 재료 및 방법

가. 생육중기의 품종별 영양결핍에 관한 연구

결구습성이 다른 3종의 상추(청축면상추, 샐러드상추, 결구상추)를 1996년 6월1일 버미큘라이트에 파종한 후 자엽전개시부터 원시균형양액의 1/2농도를 공급하였다. 본엽 3~4장 출현시 고설식 NFT시스템으로 옮겨 양액육묘를 실시하였다. 표 4-1과 같이 12처리의 양액을 채운 5ℓ의 수경용기에 6주씩 정식하였다. 에어콤포레서로 공기를 주입하여 뿌리에의 용존산소량을 증대시켰다. 실험구는 3반복 난피법으로 배치하였고, 실험기간중 증류수를 수시로 보충하여 양액량의 급격한 감소를 피했다. 처리후 5일 간격으로 엽수, 최대엽장, 엽폭, 최대근장을 조사하였으며 또한 엽록소 측정계(SPAD-502)로 상·중·하위엽의 상대엽록소를 측정하였다. 처리후 4주째가 되는 7월 10일 각 처리별로 균일한 개체를 채취하여 기본적인 생육조사를 하고 사진촬영의 재료로 사용하였다.

나. 생육후기의 품종별 영양결핍에 관한 연구

청축면상추, 샐러드상추, 결구상추의 3품종을 1996년 3월 22일에 파종하였다. 실험1과 동일한 요령으로 양액육묘한 후 본엽 15~18장정도 출현했을때 표1과 같은 각 처리별 양액 15ℓ를 채운 수경용기에 3주씩 정식하였다. 실험구는 12처리구에 3반복 난피법으로 배치하였다.

Table 4-1. The composition of nutrient solution for each of the treatments.

Treatment	NO ₃ -N	PO ₄ -P	K	Ca	Mg	B	Zn	Mn	Cu	Mo	Fe
	(Unit : me/l)					(Unit : ppm)					
control	16	4	8	8	4	0.5	0.05	0.5	0.02	0.01	3.0
-N	0	4	8	8	4	0.5	0.05	0.5	0.02	0.01	3.0
-P	16	0	8	8	4	0.5	0.05	0.5	0.02	0.01	3.0
-K	16	4	0	8	4	0.5	0.05	0.5	0.02	0.01	3.0
-Ca	16	4	8	0	4	0.5	0.05	0.5	0.02	0.01	3.0
-Mg	16	4	8	8	0	0.5	0.05	0.5	0.02	0.01	3.0
-B	16	4	8	8	4	0	0.05	0.5	0.02	0.01	3.0
-Zn	16	4	8	8	4	0.5	0	0.5	0.02	0.01	3.0
-Mn	16	4	8	8	4	0.5	0.05	0	0.02	0.01	3.0
-Cu	16	4	8	8	4	0.5	0.05	0.5	0	0.01	3.0
-Mo	16	4	8	8	4	0.5	0.05	0.5	0.02	0	3.0
-Fe	16	4	8	8	4	0.5	0.05	0.5	0.02	0.01	0

다. 영양조건이 엽채류 생장에 미치는 영향

1) 무기영양 수준이 상추 생육에 미치는 영향

적축면 상추를 1999년 3월 20일에 정식하여 10ℓ의 수정용기에 15주씩 담액수경으로 재배하였다. 배양액은 서울시립대 배양액 조성을 기본으로 하여 각각의 무기원소 수준을 다양하게 처리하여 재배하였다. 배양액 관리는 pH 5.5-6.0 EC를 1.3-1.5dS · m⁻¹로 조절하였다. 정식후 40일째 생육조사를 하였다.

2) 미량원소 수준이 상추와 미나리의 생육에 미치는 영향

‘양주 지방종’ 미나리와 ‘뚝섬 적축면’ 상추를 공시하여 담액수경 방식으로 30일간 재배한 후 수확하였다. 사용한 양액의 표준 조성은 NO₃-N 6, NH₄-N 0.5, P 2, K 4, Ca 2 및 Mg 1 me · L⁻¹였고, 양액의 pH는 3일에 1회씩 측정하여 조절하였다. 미량원소 Mo, Mn, Zn의 조성을 각각 0.5, 5, 10 mg · L⁻¹로 달리하여 재배하였다.

3) 배양액의 칼슘함량과 에틸렌 및 GR활성

GR 활성 분석은 0.2g을 정량한 후 추출용액 (50mM K-P buffer, 5% PVP, 5mM AsA, 5mM DTT, 5mM EDTA, 0.1M NaCl 함유)을 2ml 가하여 균질화하였다. 15,000g에서 5분간 원심분리한 후 상정액 150 μ l를 취하여 반응액(H₂O 2.43 ml, 1M K-P buffer(pH 7.8) 300 μ l, 10mM GSSG 60 μ l, 10mM NADPH)과 혼합하였으며 이때 산화, 환원 반응을 340nm에서 90초간의 흡광도 변화로 측정하였다. 또한 칼슘결핍에 의한 에틸렌 발생여부를 알아보기 위해 서울시립대 상추 배양액 (1 S)과 칼슘을 제거한 배양액(0 S)으로 처리 후 1, 3, 5, 7일째에 에틸렌 발생량을 측정하였다. 에틸렌 측정은 50ml 삼각 플라스크에 정단부로부터 3번째 엽위인 미전개잎 1매를 채취, 무게를 정확히 측정하여 실리콘으로 밀폐시킨 후 생육상(28 $^{\circ}$ C, 50% RH, 0 μ mol m⁻² s⁻¹ MD)에서 3시간 향온시킨 후에 1mL 주사기로 가스를 채취하여 가스크로마토그래피(Shimadzu 14A)의 FID 검출기로 측정하였다. 분석용 컬럼은 2 mm 활성 알루미늄으로써 오븐 온도는 60 $^{\circ}$ C, 주입 온도는 110 $^{\circ}$ C, 측정 온도는 120 $^{\circ}$ C, carrier gas(N₂ 가스)의 유속은 30ml min⁻¹ 을 유지했다. 가스의 정량 분석은 시료와 표준 가스의 피크 유지 시간과 피크 면적을 비교하였다.

4) 이온간의 비율

반결구 상추와 잎상추를 1998년 4월 16일 파종한 묘는 환경제어가 가능한 인공광 병용형 벤로온실에서 NFT베드(60 \times 120cm)에 5월 21일 정식하였다.

서울시립대 상추 배양액 (N: 10.8, P: 2.0, K: 6.0, Ca: 3.0, Mg: 2.0 me L⁻¹) 중 칼슘을 제외한 다른 양이온간의 배양액내 비율을 달리하여 5월 21일 처리하였다. 배양액내 Ca:K, Ca:Mg, Ca:NH₄, Ca:(K+Mg), Ca:(K+Mg+NH₄) 비율(me:me)은 표 4-2과 같으며, 미량원소는 서울시립대 상추배양액 함량으로 동일하게 공급하였다.

처리 10일째 잎끝마름이 발생한 칼슘 결핍 처리구인 Ca:K=0:9, Ca:Mg=0:5, Ca:NH₄=0:4, Ca:(K+Mg)=0:11, Ca:(K+Mg+NH₄)=0:12 처리의 GR 활성을 측정하였다. 이온유출과 엽록소 함량은 처리 3주 후에 분석하였으며, 처리 25일째에 광합성과 증산률, 생육조사 및 잎끝마름 발생률을 조사하였다.

Table 4-2. Calcium to other cation ratios of nutrient solution used in the experiment

Treatment	Cation ratio (me:me)				
Ca:K	0:9	1.5:7.5	3:6	4.5:4.5	6:3
Ca:Mg	0:5	2:3	2.5:2.5	3:2	
Ca:NH ₄	0:4	1:3	2:2	3:1	
Ca:(K+Mg)	0:11	2:9	4:7	5.5:5.5	7:4
Ca:(K+Mg+NH ₄)	0:12	2:10	4:8	6:6	8:4

2. 결과 및 고찰

가. 생육중기의 영양결핍에 의한 생육상태

1) 품종간 생육특성

표4-3에는 정식시의 품종별 생육조사를 실시한 결과이다. 엽수는 샐러드상추>결구상추>칭측면상추의 순으로 샐러드상추는 엽수는 많았으나 잎이 비교적 작았으며 엽록소함량도 낮았다. 반면에 결구상추는 상대엽록소 수치가 다른 2품종에 비해 약 2배나 높아 엽색은 매우 짙은 녹색을 나타냈다. 칭측면상추는 엽수가 적은 대신 엽장과 엽폭 모두 큰 특징을 보였다. 생체중의 경우는 3품종간에 특별한 차이는 없었다.

Table 4-3. The growth of lettuces at the beginning of transplanting.

Cultivar	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Root length (cm)	SCDS values	F r e s h weight(g)	
						Top	Root
칭측면상추	4.8	12.8	6.9	14.6	14.3	2.1	0.9
반결구상추	6.8	10.7	5.1	14.0	12.4	2.3	0.6
결구상추	5.4	12.8	5.4	12.3	26.0	2.4	0.5

2) 영양결핍 증상의 경시적인 변화

가) 엽수

표4-4은 정식후 품종별 엽수의 경시적 증가를 나타낸다. 정식후 20일간 각 품종별 상추의 엽수증가율은 약 2.0~2.7배였는데 특히 반결구상추가 가장 높았다. 무기양분 결핍이 엽수감소에 미치는 영향은 3품종 공히 정식후 10일부터 인(P)결핍구에서 가장 빨리 나타났으며 그 다음이 붕소(B)로 정식후 15일째부터 엽수가 감소하는 경향이 있었다.

나) 엽장 및 엽폭

표4-5와 표4-6에는 엽장 및 엽폭의 경시적 변화를 나타냈다. 엽수와 비슷한 경향이 나타나 각 품종 모두 정식후 10일부터 인(P)결핍구에서 엽장 및 엽폭이 가장 작은 수치를 기록했고 그와 같은 결과는 실험종료시까지 지속되었다. 그외의 양분결핍에 따른 엽장 및 엽폭 변화는 별로 없는 것으로 보아 엽장은 영양진단의 지표로서 사용되기 어려운 것이 판명되었다.

다) 최대근장

최대 근장의 경시적 변화를 보면 표4-7과 같다. 품종별로는 전 실험기간동안 청측면> 반결구> 결구상추의 순으로 길게 나타나 정식초기와 유사한 결과가 보였다. 특히 질소(N)결핍의 경우 3품종 모두 정식후 5일부터 높은 최대근장치를 기록하였으나 정식후 20일에는 대조구와 차이가 없거나 조금 낮은 수치를 기록했다. 이같은 결과는 저N농도하에서 토마토의 지하부생장이 왕성하다는 보고¹⁾와 일치하는 것이다. 그외에 마그네슘(Mg) 결핍처리구에서도 N결핍과 유사한 경향이 보였다. 이와는 반대로 철(Fe)과 붕소(B)의 경우에는 정식후 10일~15일 사이에 뿌리의 신장생장이 억제되는 경향이 있었으나 결구상추의 철(Fe)결핍구에서는 그 효과가 뚜렷하지 않았다. 그러므로 최대근장에 의한 영양진단의 경우는 질소(N), 마그네슘(Mg), 철(Fe), 붕소(B)등에서 활용가능하나 대조구와의 상대적인 결과에 지나지 않으므로 절대 수치화하는 작업이 필요한 것으로 생각된다.

라) 엽록소 함량

사람의 건강정도가 얼굴색으로 드러나듯이 엽색은 작물의 영양상태를 나타내고 있기 때문에 영양진단시스템에서 매우 중요한 요인이 된다. 본 연구에서는 비파괴적인 엽록소 측정으로 엽색을 통한 작물의 영양상태를 비교검토했다(표4-8). 3 품종중에서 압도적으로 결구상추의 엽록소함량이 많고 청축면상추와 반결구상추 간에 큰 차이는 없었다. 질소(N)결핍의 경우는 대조구에 비해 엽록소함량이 약간 낮게 나타났으며, 가장 현저한 증상이 나타난 처리구는 마그네슘(Mg)과 철(Fe)결핍구로 특히 원래 엽록소 함량이 적은 반결구상추에서 정식후 15일부터 현저히 감소했다. 따라서 청축면과 반결구상추의 경우에는 이들 무기원소의 조기 영양진단 작물로도 활용해 볼 필요가 있을 것이다. 이외에 무기원소 결핍증상이 나타나지 않았던 것은 실험기간이 짧았기 때문으로 생각되며 엽색의 변화도 다양하게 나타날 것으로 생각되므로 색채계(Colorimeter)의 활용이 필요할 것으로 생각된다.

Table 4-4. Effects of nutrient deficiency on numbers of lettuce leaves after transplanting.

(unit : cm)

Cultivar	Treatment	No. of leaves				
		0day	5day	10day	15day	20day
청축면 상 추	control	4.8	5.5	9	9.5	11.5
	-N	4.8	5.5	8	9	11.0
	-P	4.8	5.0	6	7	8.0
	-K	4.8	5.0	8	8.5	9.0
	-Ca	4.8	5.0	8	10	12.0
	-Mg	4.8	5.0	7	8	9.0
	-Fe	4.8	5.0	7.5	8	9.0
	-B	4.8	5.0	7	8	9.0
	-Zn	4.8	5.0	8	10	11.0
	-Mn	4.8	6.0	8.5	10	10.5
	-Cu	4.8	6.0	7	9	10.0
	-Mo	4.8	6.5	8	8.5	10.0
반결구 상 추	control	6.8	10.0	13.5	16.0	19.0
	-N	6.8	9.5	14.0	15.0	18.0
	-P	6.8	8.0	9.0	10.0	11.0
	-K	6.8	9.5	15.0	16.5	18.0
	-Ca	6.8	7.5	12.5	15.0	18.5
	-Mg	6.8	9.0	13.5	14.5	17.0
	-Fe	6.8	7.5	13.0	14.5	16.5
	-B	6.8	8.5	11.5	13.0	14.0
	-Zn	6.8	8.5	14.0	17.0	21.0
	-Mn	6.8	8.5	12.5	16.0	16.0
	-Cu	6.8	10.0	13.5	17.0	11.0
	-Mo	6.8	11.5	15.0	16.0	18.5
결 구 상 추	control	5.4	6.5	8.5	10.5	11.0
	-N	5.4	6.0	8.0	9.5	10.0
	-P	5.4	5.7	6.5	7.5	8.5
	-K	5.4	6.0	7.0	9.0	10.0
	-Ca	5.4	6.0	8.5	11.5	12.0
	-Mg	5.4	6.2	8.5	11.0	10.5
	-Fe	5.4	6.0	8.5	11.0	11.5
	-B	5.4	6.0	7.5	8.0	9.0
	-Zn	5.4	6.5	8.5	10.5	11.0
	-Mn	5.4	6.6	8.0	10.0	10.0
	-Cu	5.4	6.7	9.0	10.5	11.5
	-Mo	5.4	7.0	8.0	11.0	13.0

Table 4-5. Effects of nutrient deficiency on lengths of lettuce leaves after transplanting.

(unit : cm)

Cultivar	Treatment	Lengths of leaves				
		0day	5day	10day	15day	20day
청축면 상 추	control	12.8	14.4	13.8	15.7	18.6
	-N	12.8	15	14.4	15.0	16.3
	-P	12.8	10.6	11.2	11.6	12.0
	-K	12.8	12.9	13.4	15.1	16.2
	-Ca	12.8	13.1	12.7	14.7	15.8
	-Mg	12.8	12.5	12.8	13.9	14.1
	-Fe	12.8	12.4	12.9	13.9	15.2
	-B	12.8	14.0	14.3	14.5	15.7
	-Zn	12.8	15.0	16.8	17.9	19.0
	-Mn	12.8	14.2	17.2	15.2	16.0
	-Cu	12.8	13.8	13.9	13.4	17.9
-Mo	12.8	15.1	13.9	14.6	16.6	
반결구 상 추	control	10.7	12.1	14	14.4	15.8
	-N	10.7	11.7	12.1	13.8	15.7
	-P	10.7	11.2	11.8	12.0	12.5
	-K	10.7	12.8	13.9	13.7	16.1
	-Ca	10.7	12.2	12.3	13.4	15.3
	-Mg	10.7	12.6	13.1	14.0	15.9
	-Fe	10.7	11.4	10.8	12.1	13.9
	-B	10.7	11.6	12.5	13.1	14.2
	-Zn	10.7	13.2	14.4	15.2	17.4
	-Mn	10.7	11.3	12.4	13.6	14.6
	-Cu	10.7	12.7	14.4	14.6	15.8
-Mo	10.7	13.6	16.0	14.2	16.1	
결 구 상 추	control	12.8	13.3	14.1	15.6	17.0
	-N	12.8	12.7	13.7	17.0	16.2
	-P	12.8	12.0	12.9	12.9	13.0
	-K	12.8	12.8	13.8	16	16.5
	-Ca	12.8	13.5	13.8	13	14.9
	-Mg	12.8	14.7	15.5	15.6	17.0
	-Fe	12.8	12.8	14.2	15.6	16.2
	-B	12.8	13.8	14.9	13.1	14.3
	-Zn	12.8	12.0	13.4	15.8	16.0
	-Mn	12.8	12.1	13.7	14.3	15.9
	-Cu	12.8	14.8	15.0	15.7	16.1
-Mo	12.8	14.5	15.2	16.5	18.0	

Table 4-6. Effects of nutrient deficiency on widths of lettuce leaves after transplanting.

(unit : cm)

Cultivar	Treatment	Widths of leaves				
		0day	5day	10day	15day	20day
청축면 상 추	control	6.9	10.2	9.5	11.2	11.5
	-N	6.9	8.9	9.2	9.7	11.2
	-P	6.9	6.3	6.2	7.1	7.3
	-K	6.9	7.9	6.4	10.3	11.6
	-Ca	6.9	6.9	8.2	10.0	11.2
	-Mg	6.9	7.7	8.4	9.9	12.1
	-Fe	6.9	8.3	8.6	8.7	10.7
	-B	6.9	8.3	9.9	9.7	8.6
	-Zn	6.9	8.4	11.5	11.9	7.6
	-Mn	6.9	9.4	11.3	10.7	9.2
	-Cu	6.9	9.0	9.2	9.4	13.1
-Mo	6.9	9.2	9.4	10.5	11.8	
반결구 상 추	control	5.1	7.3	8.4	9.9	9.2
	-N	5.1	8.1	8.0	8.6	8.8
	-P	5.1	6.1	6.3	6.7	5.4
	-K	5.1	6.8	7.8	8.0	7.5
	-Ca	5.1	6.0	6.7	5.2	9.7
	-Mg	5.1	6.8	7.5	9.2	10.6
	-Fe	5.1	6.2	7.5	7.6	7.4
	-B	5.1	7.3	8.2	7.5	7.0
	-Zn	5.1	7.5	8.5	9.8	11.2
	-Mn	5.1	6.5	7.1	8.4	8.2
	-Cu	5.1	7.6	8.3	10.1	12.2
-Mo	5.1	7.9	8.3	8.7	12.3	
결 구 상 추	control	5.4	7.3	7.2	0.4	12.8
	-N	5.4	6.8	7.1	10.6	10.6
	-P	5.4	6.6	6.3	7	6.6
	-K	5.4	5.8	6.3	9.4	9.1
	-Ca	5.4	6.9	7.1	8.0	10.2
	-Mg	5.4	8	8.8	9.5	8.5
	-Fe	5.4	7	8.7	10	10.2
	-B	5.4	7.4	7.4	8.6	11.4
	-Zn	5.4	6.8	7.9	10.6	8.4
	-Mn	5.4	6.7	7.9	8.4	6.5
	-Cu	5.4	7.8	8.5	9.8	9.9
-Mo	5.4	8	8.1	12	13.2	

Table 4-7. Effects of nutrient deficiency on root lengths of lettuce leaves after transplanting.

(unit : cm)

Cultivar	Treatment	Root lengths of leaves				
		0day	5day	10day	15day	20day
청축면 상 추	control	14.6	18.7	23.7	34.7	48
	-N	14.6	21.4	29.2	30.2	36.2
	-P	14.6	19.3	29.9	28.9	29.3
	-K	14.6	19.9	24.8	22.2	29.2
	-Ca	14.6	18.3	22.9	22.3	31.4
	-Mg	14.6	19.3	28.1	40.5	46.1
	-Fe	14.6	16.6	23.9	25.4	30.4
	-B	14.6	15.3	18.7	20.2	29.2
	-Zn	14.6	18.5	28.1	29.1	34.6
	-Mn	14.6	18.1	22.3	33.8	44.5
	-Cu	14.6	19.8	30.9	27.7	31.2
	-Mo	14.6	21.3	29.5	28.8	35
반결구 상 추	control	14	17.6	23.7	29.2	39.6
	-N	14	23.1	30.7	32.2	35
	-P	14	19.3	25.4	30	36.8
	-K	14	18.4	22.3	19.5	26.3
	-Ca	14	14.2	18.7	24.4	28.6
	-Mg	14	19	25.9	33.2	36.9
	-Fe	14	16.5	22.7	21.1	24
	-B	14	17.7	17.7	19.1	22.6
	-Zn	14	19.3	26	28	31.3
	-Mn	14	15.4	22.9	23.8	31.5
	-Cu	14	21.6	27.2	29	30.2
	-Mo	14	21.5	26.6	25.9	34.5
결 구 상 추	control	12.3	17.6	19.8	23.5	32.7
	-N	12.3	20	24	25.5	31.1
	-P	12.3	14.4	18.9	22.8	24.5
	-K	12.3	15.4	17.8	22.6	28
	-Ca	12.3	13.1	20	26.7	28.7
	-Mg	12.3	17.3	20.5	26.4	32.8
	-Fe	12.3	12.6	18.8	22.6	29.5
	-B	12.3	15.2	18.1	17.6	16.2
	-Zn	12.3	15.1	19.3	2.19	32.3
	-Mn	12.3	15.1	14	18.7	27.3
	-Cu	12.3	17	25.8	2.38	29.1
	-Mo	12.3	17.3	22.4	23.4	30.6

Table 4-8. Effects of nutrient deficiency on SCDS values of lettuce leaves after transplanting.

(unit : cm)

Cultivar	Treatment	SCDS values				
		0day	5day	10day	15day	20day
청축면 상 추	control	14.3	14.14	12.8	14.5	16.9
	-N	14.3	13.5	14	11.9	10.5
	-P	14.3	10.3	13.2	14.1	15.8
	-K	14.3	14.6	13.3	15	18.2
	-Ca	14.3	13.2	12.9	17.3	17.1
	-Mg	14.3	15.5	12.7	6.4	4.4
	-Fe	14.3	13.8	11.6	8.3	11.8
	-B	14.3	12.5	12.9	13.2	18.1
	-Zn	14.3	14.1	14.6	13.1	16.4
	-Mn	14.3	17.9	12.3	11.2	15.2
	-Cu	14.3	14.6	11.2	11.7	17.4
	-Mo	14.3	18.8	13.2	12.4	14.7
	반결구 상 추	control	12.4	14.9	14.5	14.8
-N		12.4	13.5	13.7	12.4	12.0
-P		12.4	16.1	11.1	13.7	14
-K		12.4	15.4	16.6	17.5	18.4
-Ca		12.4	12.9	11.4	16.1	22.3
-Mg		12.4	14.7	12.6	7.2	5.3
-Fe		12.4	11.2	10.8	5.8	3.4
-B		12.4	14.2	14.1	17	13.3
-Zn		12.4	13	14.7	14.8	19.3
-Mn		12.4	13.3	14.9	12.3	13.4
-Cu		12.4	22.8	14.1	16.5	21.4
-Mo		12.4	13.5	13.6	15.4	21.4
결 구 상 추		control	26.0	30.4	29.3	31.1
	-N	26.0	32.7	26.7	27.7	26.7
	-P	26.0	31.5	26.1	28.2	27.7
	-K	26.0	33.7	26.6	27.2	30.7
	-Ca	26.0	32.7	23.4	28.2	28
	-Mg	26.0	28	20.9	18.4	21.5
	-Fe	26.0	27.4	14.6	24.3	22.9
	-B	26.0	32.2	27.2	30.4	32.4
	-Zn	26.0	30.2	30	27.1	29.5
	-Mn	26.0	33.3	25.5	28.1	29.3
	-Cu	26.0	33.2	30.7	33	38.0
	-Mo	26.0	29.2	28.4	32.2	33.8

Table 4-9. Effects of nutrient deficiency on areas of lettuce leaves in the early stage.

(unit : cm)

Cultivar	Control	-N	-P	-K	-Ca	-Mg	-S	-Fe	-B	-Zn	-Mn	-Cu	-Mo
앞상추	221.4	17.3	16.2	21.8	26.8	51.2	20.0	49.6	36.5	212	107	165	216
반결구 상추	394.0	15.9	14.9	18.4	39.1	56.1	18.0	23.1	37.4	330	116	140	299
결구 상추	224.5	16.5	15.8	17.8	13.2	34.9	17.3	23.5	36.0	244	78	114	231

Table 4-10. Effects of nutrient deficiency on sizes of lettuce in the middle stage.

(unit : cm²)

Cultivar	Control	-N	-P	-K	-Ca	-Mg	-S	-Fe	-B
앞상추	1258	340	440	957	252	992	400	914	810
반결구 상추	1330	224	575	1224	451	1155	380	1120	1200
결구 상추	960	162	475	870	348	868	232	924	910

상추의 크기는 상추 1주의 가로폭과 세로폭을 곱한 수치임

Table 4-11. Effects of nutrient toxicity on areas of lettuce leaves in the middle stage.

(unit : cm)

Cultivar	Control	+Fe	+B	+Zn	+Mn	+Cu	+ Mo
앞상추	149.0	48.0	72.0	13.0	52.0	11.0	133.0
반결구 상추	144.0	13.5	35.7	12.7	47.5	21.1	140.0
결구 상추	187.0	45.0	82.0	39.0	74.5	19.0	170.0

나. 상추(잎상추, 반결구 상추, 결구상추) 생육중기의 영양결핍 증상

본엽 5~6장 출현시부터 4주동안 필수무기원소의 공급을 중단했을때 나타난 생리장해 증상과 실험광경을 사진으로 나타냈다. 3품종중 무기원소의 결핍에 대한 증상이 가장 민감하게 나타난 것은 '반결구 상추'이었고 그 다음이 '결구상추'이었으며 '청측면 상추'는 비교적 둔감하게 나타났다. 가장 현저한 증상을 보인 것은 인(P)결핍으로 3품종 모두 지상부와 지하부의 생장이 극도로 제한되었으나 특히 하엽이 고사하였으며 엽발육은 거의 중지된 것처럼 보였다.

그 다음으로는 붕소(B)결핍에 의한 생장억제를 들 수 있는데 색의 변화는 없었으나 '반결구'상추의 경우 생장점이 괴사한 것으로 나타났다.

칼슘(Ca)결핍의 경우에도 생장억제와 함께 잎가장자리 조직의 괴사에 의해 잎이 말려드는 증상이 나타났다.

철(Fe)결핍에 대한 증상은 '반결구'상추에서 가장 심해 전체 잎이 황백색으로 변하고 생장 또한 크게 억제되었으나 결구상추의 경우는 약간 둔감한 반응을 보였다.

마그네슘(Mg)결핍에 대한 증상은 지상부 생장의 현저한 저하는 보이지 않았으나 철(Fe)결핍과 유사하게 황백화 현상이 관찰되었다.

질소(N)결핍증상은 약간의 생장저하와 함께 하엽(下葉)의 잎가장자리가 황갈색으로 변하면서 시드는 것이 보였다.

칼륨(K)결핍증상을 명백히 나타나지 않았으며 Cu, Mn, Zn, Mo등의 미량원소결핍 증상은 일부 잎이 황화된 것 이외에는 특별한 증상이 나타나지 않았다.

다. 상추(잎상추, 반결구 상추, 결구상추) 생육후기의 영양결핍 증상

정식 후 3주부터 청측면 상추와 반결구 상추는 영양결핍에 의한 생리장해 현상이 나타나기전에 추대가 되기 시작하였다. 한편 결구상추의 경우 실험1과는 달리 특정무기원소의 결핍에 대해서만 증상이 나타났다.

즉 질소(N)와 마그네슘(Mg), 철(Fe)의 경우는 엽색이 옅은 녹색이었고 칼슘(Ca)의 경우는 결구외엽의 조직이 일부 갈변된 증상을 나타냈으나 그 외의 무기원소결핍에 대한 외적증상은 나타나지 않았다.

외부증상은 질소(N)와 붕소(B)결핍에서 결구가 작은 영향이 있으며 칼슘의 경우에 외부엽의 갈변현상이 관찰되었다. 한편 절단면을 보면 붕소결핍의 증상이 가장 심하게 나타났는데 생장점부근의 결구내부의 소엽이 갈색으로 피사하였고 줄기가장자리의 윤곽도 갈변되어 있었다. 몰리브덴(Mo)의 경우는 결구내엽에는 특별한 증상이 관찰되지 않았으나 줄기가장자리 유관속 부분이 붕소와 비슷하게 갈변화하는 증상을 보였다. 칼륨(K)과 칼슘의 경우는 녹색을 띤 결구외엽의 엽맥 부분이 갈색으로 변하는 증상이 보였으나 결구내엽이나 줄기 유관속 등에는 특별한 증상이 나타나지 않았다.

이들 이외의 무기양분 결핍에 대한 증상은 관찰되지 않았는데 이는 생육중기에는 작물체내에 이미 상당량의 무기원소를 축적하고 있기 때문에 그 후에 영양결핍처리를 해도 일부 체내이동이 어려운 원소를 제외하고는 특별한 증상이 나타나지 않은 것으로 생각된다.

그러나 본 연구에서 칼륨(K), 칼슘(Ca)과 붕소결핍의 경우 특히 외관상으로는 전혀 증상이 나타나지 않았으나 결구 내·외엽에 치명적인 증상이 나타났으므로 이들 양분의 생리장해의 경우 조기에 진단할 수 있는 방법규명이 절실할 것으로 생각된다.

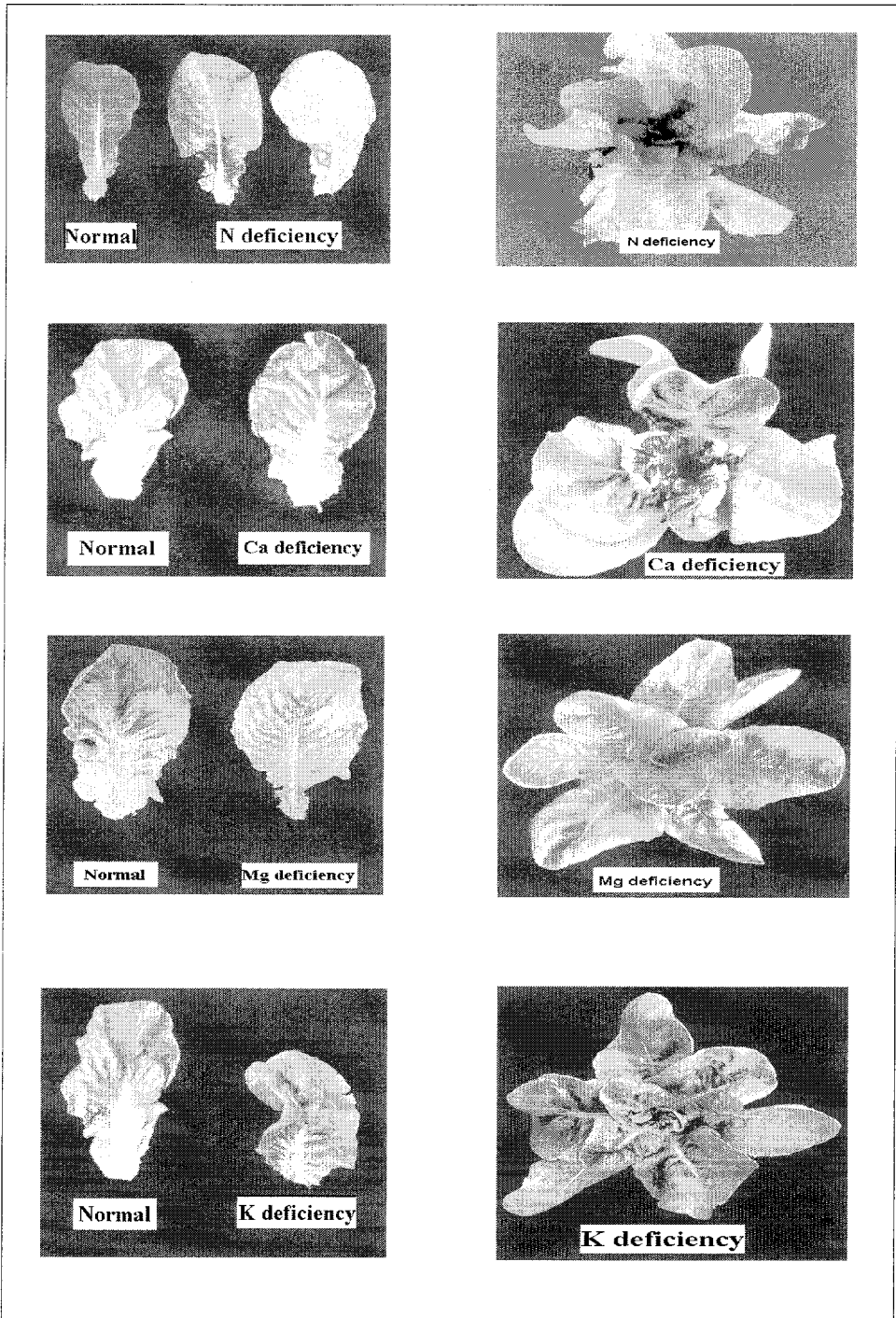


Plate 4-1. The deficiency of macro-nutrients in leaves of butterhead lettuce 'Omega'.

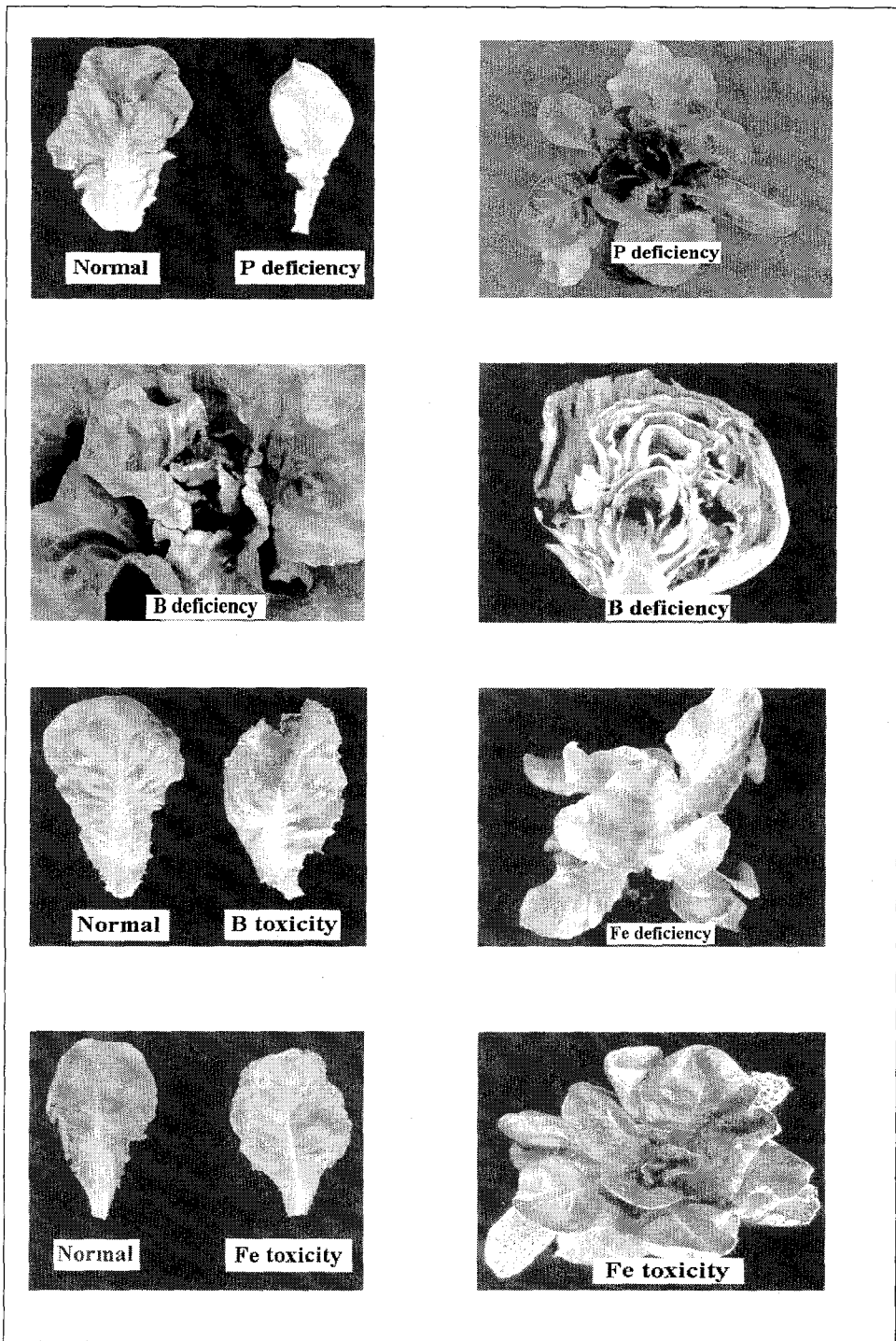


Plate 4-2. The deficiency and toxicity of mineral nutrients in leaves of butteraed 'Omega'.

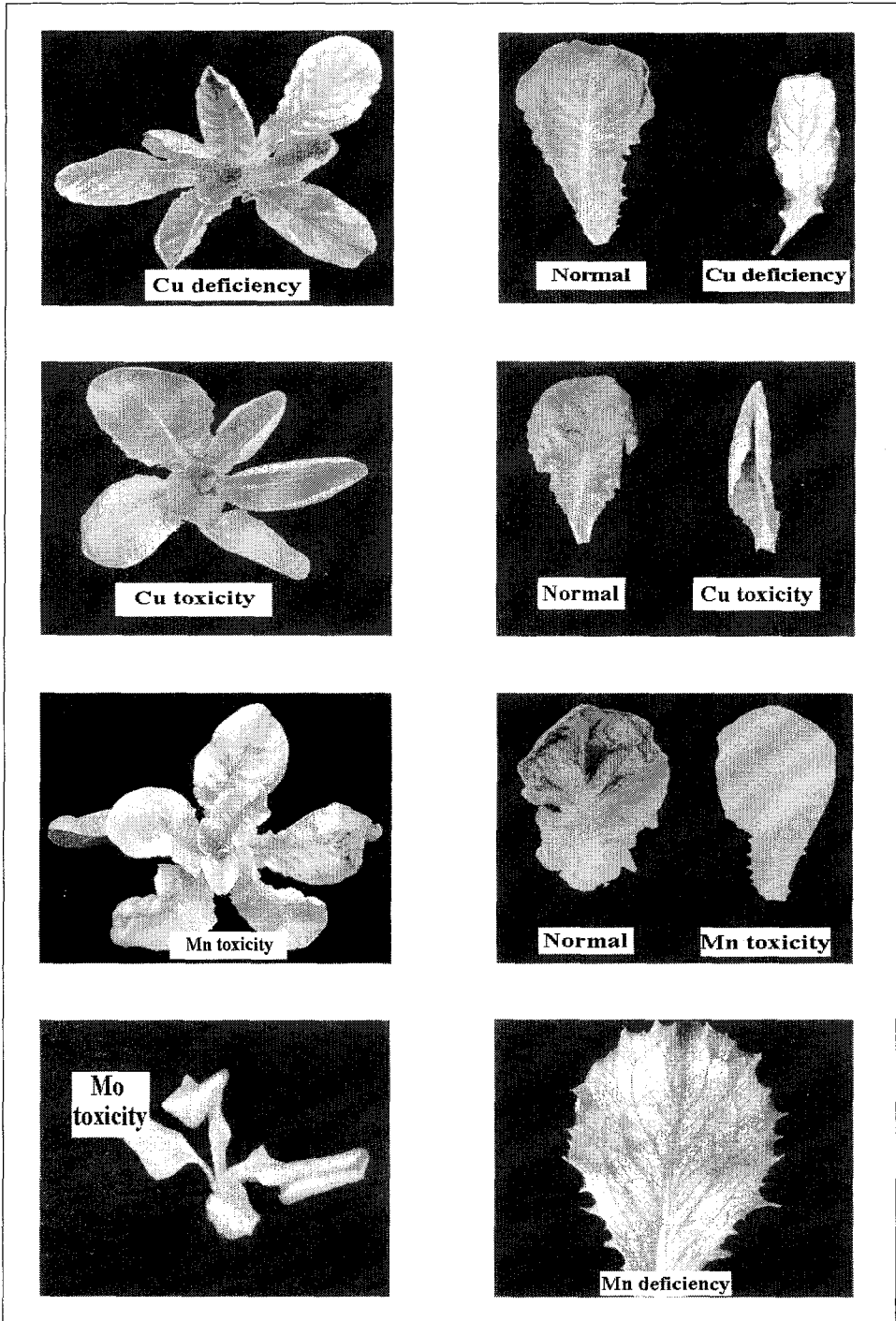


Plate 4-3. The deficiency and toxicity of micro nutrients in leaves of buttered 'Omega'.late 4-2.

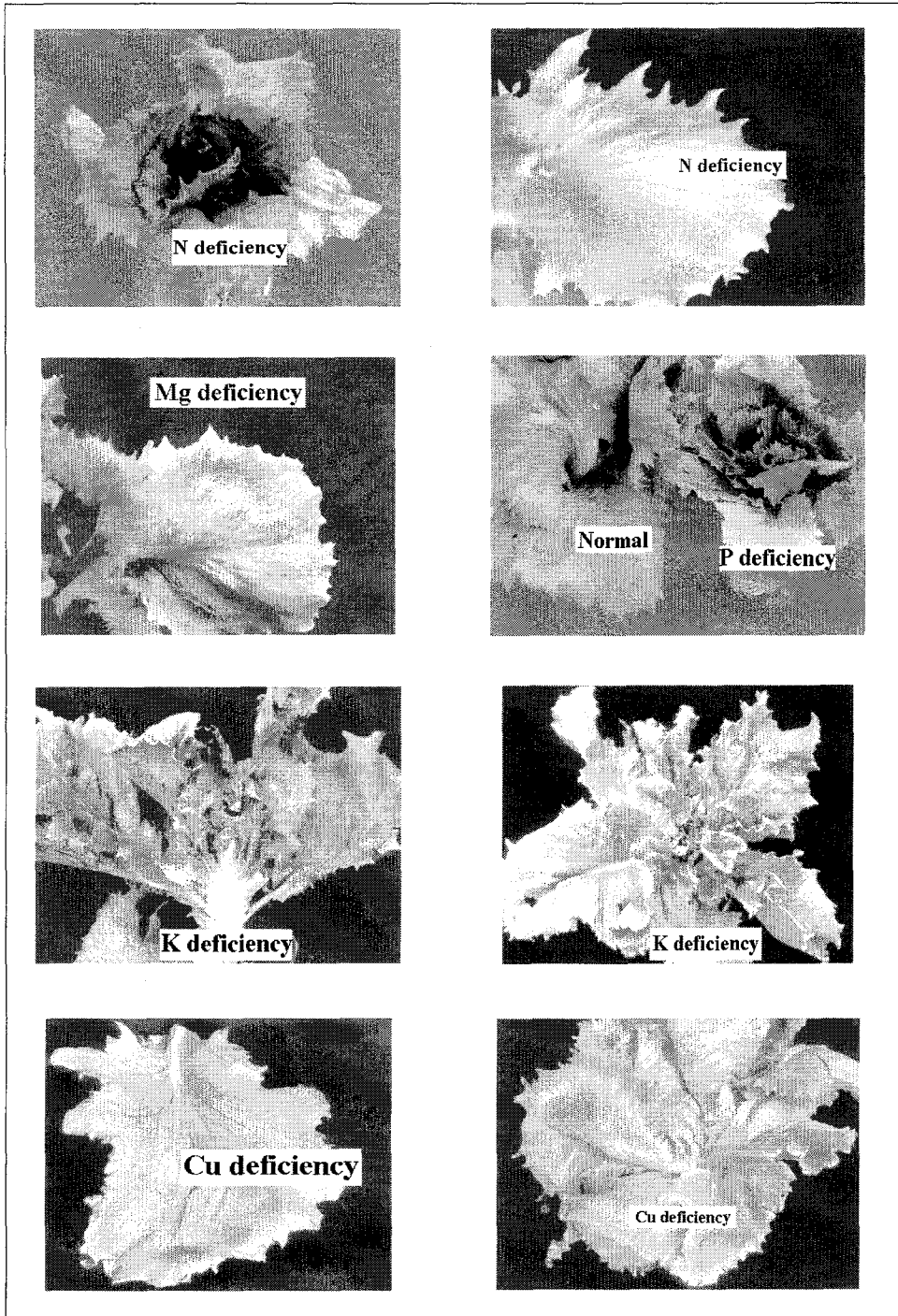


Plate 4-4. Plate 4-2. The deficiency of mineral nutrients in leaves of lettuce.

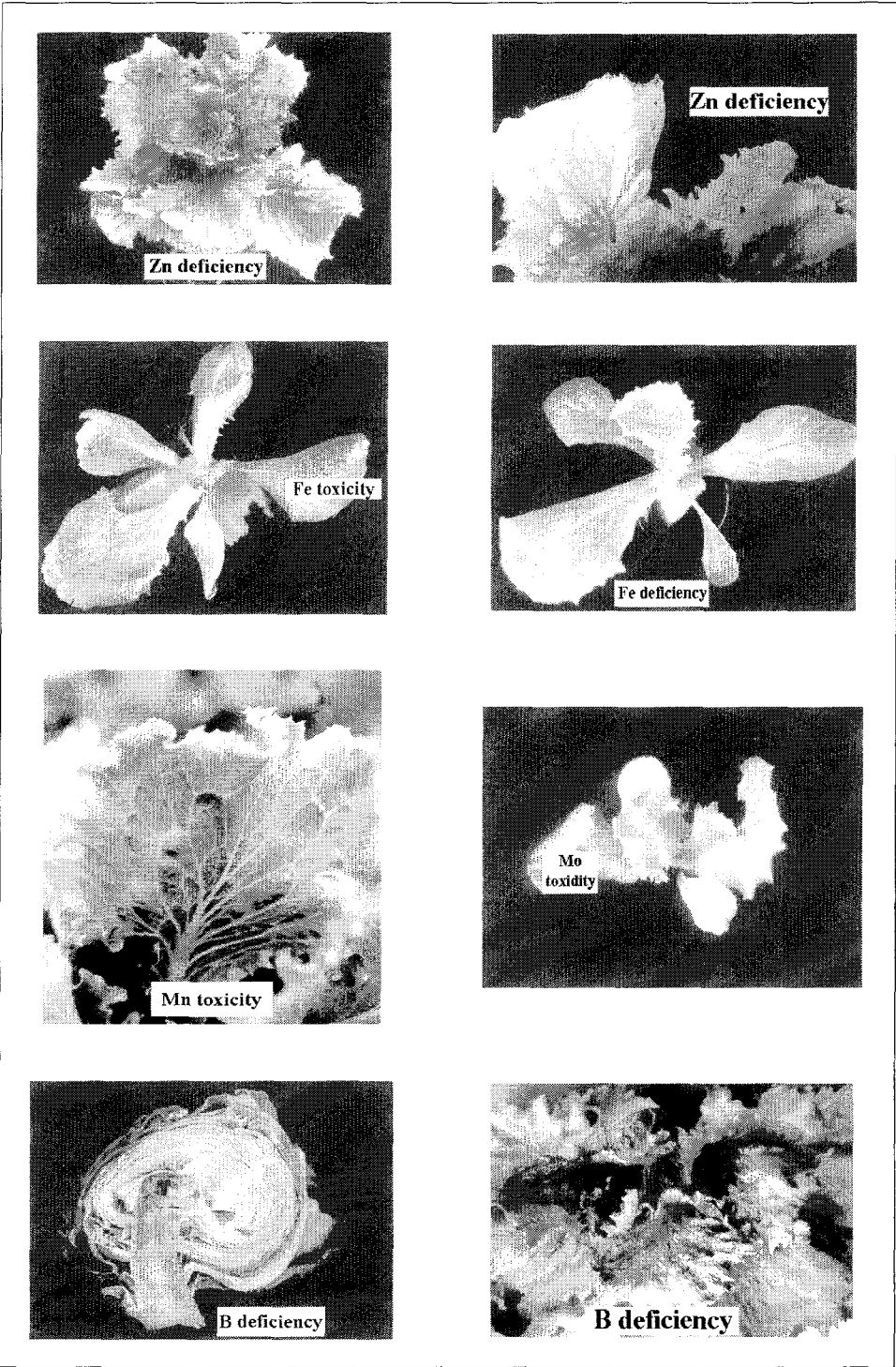


Plate 4-5. The deficiency and toxicity of mineral nutrients in leaves of lettuce.

라. 최적 영양상태 구명

1) 상추 영양진단기준 설정

현재 '96~'98년 동안 실험 결과를 정리하여 상추류의 식물체 분석자료를 중심으로 한 영양 진단 기준(Table 4-13)과 근권 무기양분별 적정 수준을 정리하였다.(Table 4-12)

근권의 EC와 pH에 변화와 무기영양의 결핍, 과잉시 엽내 무기영양분의 변화를 나타내었다.(Table 4-14~4-16)

Table 4-12. The optimum concentrations of the nutrient solution in lettuce root zone.

	Optimum (ppm)	Deficiency (ppm)	Sufficiency (ppm)	Toxicity (ppm)
pH	5.5-6.2	<0.5	5.0-6.5	>7.0
EC(mS · cm ⁻¹)	1.8-2.0	<1.2	1.5-2.4	>2.5
NO ₃ ⁻	160-200	<100	100-250	>250
NH ₄ ⁺	<7	-	0-7	>10
P	25-35	<20	20-50	>60
K	170-240	<100	150-400	>400
Ca	180-220	<100	100-300	>300
Mg	24-30	<20	20-80	>100
S	40-60	<20	20-100	>100
Fe	1.6	<0.4	0.5-4.0	>5.0
Mn	0.40	<0.2	0.2-1.5	>1.6
Zn	0.25	<0.1	0.1-0.8	>0.9
B	0.50	<0.2	0.2-1.0	>1.1
Cu	0.04	<0.01	0.01-1.0	>0.15
Mo	0.02	<0.01	0.01-1.0	>0.11
Si	14.0	-	10-40	>80

Table 4-13. The adequate, deficiency and toxicity ranges of nutrient concentration in the lettuce leaves.

Element	Deficiency	Adequate	Toxicity
N (%)	<2.5	3.5-5.5	>6.0
P (%)	<0.2	0.5-0.8	>0.8
K (%)	<2.5	5-10	>13
Ca (%)	<0.6	0.8-1.8	>2.0
Mg (%)	<0.2	0.3-0.9	>1.0
S (%)	<0.1	0.2-0.5	>1.0
Fe (ppm)	<100	130-1400	>1500
Mn (ppm)	<20	50-200	>300
Zn (ppm)	<17	30-300	>520
B (ppm)	<20	30-60	>80
Cu (ppm)	<2.0	5-15	>20
Mo (ppm)	<0.12	0.2-2.0	>280

Table 4-14. Effects of the nutrient concentration on nutrient contents in the butterhead lettuce 'Omega'.

EC	Element	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn
		-----%-----				-----ppm-----				
0.8		4.090	0.483	1.3	1.048	0.308	210.6	73.2	12.8	24.2
1.2		4.916	0.615	1.9	1.170	0.377	283.4	68.0	15.0	27.0
1.6		5.014	0.635	3.6	1.010	0.353	263.6	80.4	16.2	28.4
2.0		5.162	0.767	3.2	1.060	0.390	282.2	99.6	14.6	47.4
2.4		5.150	0.845	2.8	1.183	0.375	292.2	100.6	13.8	53.8
3.6		5.384	0.701	3.2	0.691	0.321	261.8	66.8	15.2	45.0

Table 4-15. Effects of the nutrient concentration on nutrient contents in the lettuce 'Brigida'.

EC	Element	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn
		-----%-----				-----ppm-----				
0.8		4.226	0.483	1.3	1.048	0.308	210.6	73.2	12.8	24.2
1.2		4.354	0.615	1.9	1.170	0.377	283.4	68.0	15.0	27.0
1.6		5.027	0.635	3.6	1.010	0.353	263.6	80.4	16.2	28.4
2.0		4.953	0.767	3.2	1.060	0.390	282.2	99.6	14.6	47.4
2.4		5.162	0.845	2.8	1.183	0.375	292.2	100.6	13.8	53.8
3.6		5.384	0.701	3.2	0.691	0.321	261.8	66.8	15.2	45.0

Table 4-16. Effects of pH values in the nutrient solution on nutrient contents in the lettuce leaves.

Element pH	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn
	-----%-----					-----ppm-----			
3.0	3.88	0.325	0.86	0.547	0.274	230.2	156.0	19.0	34.75
4.0	5.70	0.816	1.42	0.771	0.485	234.6	194.0	20.0	55.4
5.0	4.74	0.929	2.2	0.712	0.418	356.4	194.4	24.6	47.8
5.5	5.39	0.873	2.6	0.678	0.403	288.0	116.6	23.2	43.8
6.0	5.28	0.797	3.2	0.734	0.406	280.4	132.4	30.0	30.0
6.5	5.23	0.798	3.4	1.131	0.404	269.2	129.2	20.6	28.0
7.0	5.10	0.668	2.4	0.758	0.300	277.6	107.0	14.8	10.4
8.0	5.66	0.767	2.8	0.587	0.351	254.2	158.8	62.2	50.6

2) 다량원소 수준이 상추의 생육에 미치는 영향

작물의 생육은 여러 환경요인이 복합적으로 관여하여 나타나지만, 그중에서도 일차적으로 생각할 수 있는 요인은 무기양분이다. 작물 생육은 근권 무기양분의 결핍, 적정, 과잉에 따른 생장의 차이를 명확히 나타냈다.(Table 4-17~4-21)

Table 4-17. Plant characteristics of lettuce 'Juc-chuck-myun' grown by nitrogen treated with six levels until for 40days after planting in the NFT system.

N levels (ppm)	Leaf	Leaf	Fresh weight		Dry weight	
	length	width	(g/plant)		(g/plant)	
	(cm)	(cm)	Shoot	Root	Shoot	Root
0	8.33 d ^z	9.73 d	15.44 f	17.30 d	2.05 d	1.69 d
50	15.87 c	15.10 c	83.28 e	34.21 c	6.97 c	3.81 ab
100	18.13 bc	17.80 b	155.28 d	33.22 c	11.17 b	2.66 cd
150	20.33 b	19.67 a	217.22 b	45.80 b	13.34 b	2.90 bc
200	23.13 a	19.47 a	266.77 a	64.60 a	19.24 a	4.60 a
250	19.80 b	18.67 ab	211.83 c	46.09 b	13.76 b	3.29 bc

^zMeasuring within columns by Duncan's multiple range test at P=0.05.

Table 4-18. Plant characteristics of lettuce 'Juc-chuck-myun' grown by potassium treated with six levels until for 40days after planting in the NFT system.

K levels (ppm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)	
			Shoot	Root
0	8.90 d ^z	9.20 c	30.75 c	14.41 b
10	18.53 c	14.83 b	99.21 ab	20.69 a
50	19.35 bc	14.55 b	88.50 a	14.94 ab
100	21.03 abc	15.45 ab	100.22 a	16.72 a
150	22.55 a	17.55 a	117.38 a	17.19 a
300	21.00 ab	13.52 ab	88.67 a	14.07 a

^zMeasuring within columns by Duncan's multiple range test at P=0.05.

Table 4-19. Plant characteristics of lettuce 'Juc-chuck-myun' grown by calcium treated with six levels until for 40days after planting in the NFT system.

Ca levels (ppm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)	
			Shoot	Root
0	16.8 c ^z	15.6 cd	61.3 c	23.54 a
10	22.7 ab	12.4 e	42.1 c	17.76 b
50	19.7 bc	13.7 de	65.4 bc	17.89 ab
100	20.0 bc	17.7 bc	97.3 b	13.95 b
150	23.0 ab	21.7 a	168.3 a	16.82 b
200	25.0 a	20.0 ab	185.8 a	20.53 ab

^zMeasuring within columns by Duncan's multiple range test at P=0.05.

Table 4-20. Plant characteristics of lettuce 'Juc-chuck-myun' grown by magnesium treated with six levels until for 40days after planting in the NFT system.

Mg levels (ppm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)	
			Shoot	Root
0	20.0 bc ^z	18.0 b	123.36 c	20.65 d
10	24.0 a	21.0 a	154.3 b	36.82 b
50	24.0 a	22.0 a	182.21 a	42.0 a
100	22.0 ab	19.5 ab	145.5 b	39.67 ab
150	19.33 bc	19.5 ab	148.5 b	36.5 b
200	18.33 c	18.0 b	100.67 d	33.0 c

^zMeasuring within columns by Duncan's multiple range test at P=0.05.

Table 4-21. Plant characteristics of lettuce 'Juc-chuck-myun' grown by phosphorus treated with six levels until for 40days after planting in the NFT system.

P levels (ppm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
			Shoot	Root	Shoot	Root
			0	9.5 c ^z	10.9 d	27.2 f
10	21.7 b	22.3 bc	187.8 b	23.1 b	14.4 b	1.5 b
50	25.3 a	23.7 a	229.7 a	31.6 a	23.4 a	2.0 a
100	25 a	21.17 c	119.8 e	17.2 d	7.0 d	1.4 b
150	25 a	23.0 ab	180.5 c	22.7 b	12.0 c	2.4 a
200	26 a	23.3 a	149.2 d	21.3 c	11.7 c	2.1 a

^zMeasuring within columns by Duncan's multiple range test at P=0.05.

3) 미량원소수준이 상추와 미나리의 생육에 미치는 영향

Table 4-22. Effect of Mo, Zn and Mn concentration in nutrient solution on growth of hydroponically grown leaf lettuce and *Oenanthe stolonifera* DC.

Crops	Macro-elements	Concen. (ppm)	Leaf length (cm)	No. of leaves	Fresh weight (g/plant)	Dry weight (g/plant)
Leaf lettuce	Mo	0.5	23.4	13.8	69.8	3.00
		5	24.5	13.7	71.1	3.12
		10	24.2	13.3	70.5	2.93
	Zn	0.5	23.4	13.8	69.8	3.09
		5	23.5	14.3	71.3	3.14
		10	22.8	13.3	68.8	2.96
	Mn	0.5	23.4	13.8	69.8	3.04
		5	22.9	12.7	68.7	3.01
		10	23.5	13.7	66.0	2.98
		Control		23.6	13.9	69.4
<i>O. stolonifera</i> DC.	Mo	0.5	35.3	19.2	34.3	3.26
		5	36.2	19.6	35.1	3.41
		10	35.6	19.7	35.4	3.43
	Zn	0.5	35.3	19.2	34.3	3.28
		5	35.9	21.3	36.2	3.46
		10	35.7	20.6	37.1	3.68
	Mn	0.5	35.3	19.2	34.3	3.31
		5	35.8	19.4	35.1	3.49
		10	34.6	18.7	34.7	3.41
		Control		35.8	20.4	35.7

Table 4-23. Effect of Mo concentration in nutrient solution on NO₃⁻ content, NRA and GSA of hydroponically grown leaf lettuce and *Oenanthe stolonifera* DC.

Crops	Micro-element	Conc. (ppm)	NO ₃ ⁻ content (mg/kg F.W.)	NRA (μ mole \cdot g ⁻¹ \cdot FW ⁻¹ \cdot h ⁻¹)	GSA (μ mole \cdot g ⁻¹ \cdot FW ⁻¹ \cdot h ⁻¹)
Leaf lettuce	Mo	0.5	3,138 ab	28.3 ab	30.1 a
		5	3,014 b	31.1 a	31.2 a
		10	3,016 b	31.4 a	31.6 a
	Zn	0.5	3,214 ab	27.6 ab	29.4 ab
		5	3,101 ab	28.8 ab	29.9 ab
		10	3,099 b	28.9 ab	29.4 ab
	Mn	0.5	3,395 a	25.3 b	27.8 b
		5	3,416 a	23.6 bc	26.6 b
		10	3,458 a	23.4 bc	26.0 b
		Control	3,254 ab	28.6 ab	30.3 a
<i>O. stolonifera</i> DC.	Mo	0.5	4,342 b	25.2 b	26.8 a
		5	4,128 bc	28.3 a	27.0 a
		10	4,108 bc	28.9 a	26.9 a
	Zn	0.5	4,352 b	25.5 b	27.4 a
		5	4,317 b	25.8 b	27.3 a
		10	4,295 b	25.3 b	27.1 a
	Mn	0.5	4,753 a	23.2 bc	25.7 ab
		5	4,812 a	22.0 c	24.4 b
		10	4,931 a	22.1 c	23.9 b
		Control	4,631 a	24.8 b	24.1 b

²⁾ : Means separation within columns by duncan's multiple range test at 5% level.

4) 계절과 배양액농도가 상추와 미나리의 생육, 질소대사 관여효소(NRA, GSA) 활성에 미치는 영향

가) 계절(기상환경)과 생육단계의 영향

Table 4-24. Seasonal changes of NO_3^- content according to the leaf position of hydroponically grown leaf lettuce and *O. stolonifera* DC.

Crops	Season	NO_3^- content ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{FW}$)						
		Leaf position						
		1	2	3	4	5	6	7
Leaf lettuce	Spring	3,346a ²⁾	3,258b	2,954ab	2,836b	2,854b	2,839b	2,804ab
	Summer	2,814b	2,811c	2,786b	2,704b	2,728b	2,704b	2,693b
	Winter	3,654a	3,651a	3,296a	3,210a	3,184a	3,216a	3,198a
<i>O. stolonifera</i> DC	Spring	4,490b	4,293b	3,954b	3,896ab	3,869ab	3,958ab	3,796ab
	Summer	4,036c	3,901c	3,634c	3,627b	3,616ab	3,694b	3,548b
	Winter	4,830a	4,695a	4,216a	4,258a	4,146a	4,238a	4,021a

²⁾ : Means separation within columns by duncan's multiple range test at 5% level.

Table 4-25. Seasonal changes of NRA according to the leaf age of hydroponically grown leaf lettuce and *O. stolonifera* DC.

Crops	Season	NRA ($\mu \text{mole} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{FW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)		
		Leaf age(days)		
		10	15	20
Leaf lettuce	Spring	27.6 b ²⁾	32.3 b	20.9 b
	Summer	32.4 a	38.5 a	24.6 a
	Winter	23.5 c	28.6 c	15.7 c
<i>O. stolonifera</i> DC	Spring	25.4 b	30.1 a	16.2 b
	Summer	28.4 a	31.0 a	18.6 a
	Winter	19.8 c	24.8 b	13.5 c

²⁾ : Means separation within columns by duncan's multiple range test at 5% level.

Table 4-26. Seasonal changes of GSA according to the leaf age of hydroponically grown leaf lettuce and *O. stolonifera* DC.

Crops	Season	GSA(μ mole \cdot g ⁻¹ \cdot FW ⁻¹ \cdot h ⁻¹)		
		Leaf age (days)		
		10	15	20
Leaf lettuce	Spring	25.6	38.1	19.8
	Summer	38.7	44.6	30.6
	Winter	17.9	32.1	14.3
<i>O. stolonifera</i> DC.	Spring	19.5	31.6	16.8
	Summer	30.1	39.8	23.4
	Winter	15.9	26.4	13.2

Table 4-27. Seasonal changes of NO₃⁻ content according to the leaf age of hydroponically grown leaf lettuce and *O. stolonifera* DC.

Crops	Seasons	NO ₃ ⁻ content (mg \cdot kg ⁻¹ \cdot FW)		
		Leaf age(days)		
		10	15	20
Leaf lettuce	Spring	2.938	3.216	3.624
	Summer	2.431	2.784	2.936
	Winter	3.144	3.625	3.946
<i>O. stolonifera</i> DC	Spring	3.104	4.106	4.843
	Summer	3.046	3.954	4.765
	Winter	3.458	4.836	5.693

나) 이온농도 영향

Table 4-28. Effect of ionic strength on growth of hydroponically grown leaf lettuce and *Oenanthe stolonifera* DC.

Crops	Ionic strength	Leaf length (cm)	No. of leaves	Fresh weight (g/plant)	Dry weight (g/plant)
Leaf lettuce	0.5S	18.3 b	12.7 b	64.2 c	2.16 b
	1.0S	22.5 ab	16.3 a	83.1 b	3.32 a
	1.5S	24.9 a	16.0 a	94.3 a	3.44 a
	2.0S	25.4 a	17.4 a	101.1 a	3.54 a
<i>O. stolonifera</i> DC.	0.5S	28.5 b	18.2 b	15.5 c	1.80 c
	1.0S	38.2 b	25.0 a	26.1 b	3.01 b
	1.5S	38.0 b	26.1 a	28.2 b	3.06 b
	2.0S	44.5 a	27.8 a	37.8 a	4.24 a

²⁾ : Means separation within columns by duncan's multiple range test at 5% level.

Table 4-29. Effect of ionic strength on NO₃⁻ content, NRA and GSA of hydroponically grown leaf lettuce and *Oenanthe stolonifera* DC.

Crops	Ionic strength	NO ₃ ⁻ content (mg/kg F.W.)	NRA (μ mole \cdot g ⁻¹ \cdot FW ⁻¹ \cdot h ⁻¹)	GSA (μ mole \cdot g ⁻¹ \cdot FW ⁻¹ \cdot h ⁻¹)
Leaf lettuce	0.5S	2,892 c	20.4 d	25.1 d
	1.0S	3,592 bc	29.6 c	32.7 c
	1.5S	3,894 b	34.9 b	37.3 b
	2.0S	4,330 a	40.2 a	44.6 a
<i>O. stolonifera</i> DC.	0.5S	3,594 c	18.6 d	21.4 d
	1.0S	4,709 bc	26.9 c	27.7 c
	1.5S	5,124 b	30.6 b	33.2 b
	2.0S	5,838 a	37.2 a	39.8 a

²⁾ : Means separation within columns by duncan's multiple range test at 5% level.

5) 배양액의 칼슘 함량과 에틸렌 및 GR 활성

배양액 중에 칼슘이 존재하더라도 이온간의 비율이 적합하지 못하면 지상부의 칼슘의 흡수는 저해될 수 있다. 더욱이 배양액 중의 칼슘이 없을 때 상추의 품질과 관련된 잎끝마름 발생 원인을 에틸렌 발생과 항산화 효소를 측정하여 체내 생리학적 반응을 알아보려고 일련의 실험을 수행하였다.

에틸렌은 식물의 노화과정, 과실의 성숙에 관여하는 가스상 식물호르몬으로 저온, 건조, 담수와 같은 환경 요인에 의해, 또는 병원균의 감염으로, 종자의 형태적 반응 등에 의해 유도되는 것으로 'triple response'라고도 한다(Yang과 Hoffman, 1984). 즉 환경 스트레스 조건에서는 식물 조직내에서 free radical에 의해 지질 과산화이 일어나 그 결과로 에틸렌이나 에탄이 생성된다고 보고되고 있다(Sakaki 등, 1983). 따라서 칼슘 부족에 의한 에틸렌 발생 여부를 알아보려고 NFT 베드에서 반결구 상추와 잎상추를 1주일간 순화시킨 후 배양액내 칼슘 유, 무에 의한 에틸렌 발생량을 처리 시간 변화율로 분석하였다(Fig. 4-1). 배양액의 칼슘 결핍 처리에서 반결구 상추의 에틸렌 발생은 처리 초기부터 배양액의 칼슘이 정상적인 비율로 첨가된 처리보다 낮아 칼슘 결핍에 의한 에틸렌 발생을 확인할 수 없었다. 그러나 잎상추는 처리 1일째 칼슘 결핍구의 에틸렌은 칼슘 처리구에 비해 1.2배 높은 $22\mu\text{lg}^{-1}\text{h}^{-1}$ 가 발생한 후 처리 3일째는 0.5배 높았으나 5일째는 차이가 없다가 7일째는 칼슘 처리구보다 낮았다. 두 품종 모두 처리 5일째 부터는 에틸렌 발생이 감소하였으며, 반결구 상추에서는 이 시기 잎끝마름이 발생하였다. 즉 칼슘 결핍으로 발생한 잎끝마름은 에틸렌 발생을 감소시킨 것으로 나타났다.

표 4-30은 배양액의 양이온 조성 중 칼슘이 결핍된 Ca:K, Ca:Mg, Ca:NH₄, Ca:(K+Mg), Ca:(K+Mg+NH₄) 비율이 각각 0:9, 0:5, 0:4, 0:11, 0:12 처리가 GR 활성에 미친 영향이다.

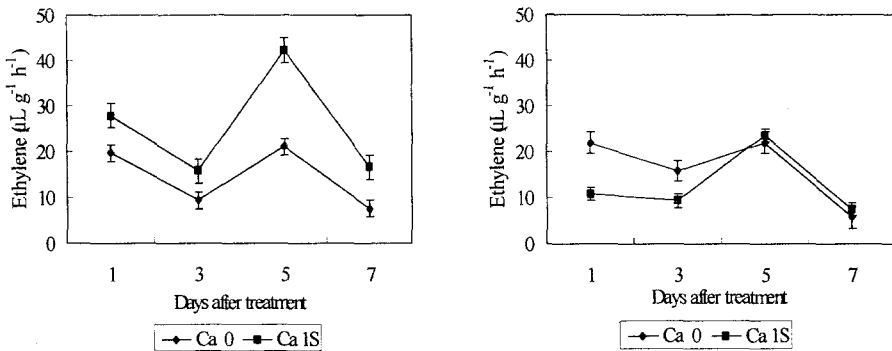


Fig. 4-1. Changes in ethylene evolution of butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) depending on Ca treatment.

처리 10일째 잎끝마름이 발생된 미전개잎의 GR 활성은 대조구에 비해 반결구 상추는 3.00~17.51배, 잎상추는 1.41~4.06배 높았다. 또한 잎상추에 비해 반결구 상추의 칼슘 결핍에 따른 무기 양이온 과잉 처리가 항산화 효소의 활성을 증가시켰다. 특히 반결구 상추는 Mg 과잉 처리에서, 잎상추는 NH₄ 과잉 처리에서 GR 활성이 가장 높게 나타나 상추 품종에 따라 과잉 처리된 무기이온의 반응이 달랐으며, 칼슘 결핍에 의한 잎끝마름 발생은 체내 GR 활성을 높인 것으로 나타났다.

이와같이 GR 효소 활성이 높은 것은 스트레스에 대한 체내 반응임과 동시에 일종의 방어기능이 작용한 것으로 보이며, GR 활성은 식물체가 온도, 수분 등과 같은 재배 환경 스트레스를 받았을 때 증가한 것으로 Smirnoff와 Colombe(1988), Smith 등(1989)의 결과와도 같았다.

한편 과잉 처리된 무기 양이온 중 처리 5일째 마그네슘 과잉 처리는 잎이 황화되면서 엽반 현상을 띠는 가시장해가 관찰되어 칼슘 결핍으로 인한 길항 원소로 가장 먼저 반응하였다.

Table 4-30. Effect of the Ca-deficiency-induced other cations of nutrient solution on glutathione reductase activity in butterhead and leaf lettuce.

Treatment (me:me)	(unit: $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg protein}^{-1}$)	
	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
Ca:K=0:9	101.5 c ^z	220.6 bc
Ca:Mg=0:5	500.9 a	292.2 bc
Ca:NH ₄ =0:4	85.8 c	636.4 a
Ca:(K+Mg)=0:11	202.7 b	350.2 b
Ca:(K+Mg+NH ₄)=0:12	228.4 b	583.6 a
Control	28.6 d	156.8 c

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

6) 이온간의 비율

가) 배양액내 Ca:K 비율

식물체내 칼슘과 가리간의 흡수 정도는 가리가 원형질 막을 빨리 이동함에 따라 2가 이온인 마그네슘과 칼슘과 같은 원소는 이온의 이동율을 저하시키는 것으로 알려졌다(Marshner, 1995). 그러나 배양액내 칼슘과 가리의 총 당량은 같게 유지하고 칼슘과 가리의 비율을 각각 0:9, 1.5:7.5, 3:6, 4.5:4.5, 6:3으로 달리하였을 때 칼슘 길항 이온으로서 가리와 관계의 관계를 알아보기위해 반결구 상추와 잎상추의 광합성, 증산률 및 생육과 잎끝마름증 발생률을 조사하였다. 배양액의 칼슘과 가리 비율 0:9 처리는 처리 초기에 극심한 생육저하와 함께 잎끝마름이 발생하고 고사함에 따라 광합성과 증산률을 측정하지 못했다. 반결구 상추와 잎상추의 배양액내 Ca:K 비율에 따른 광합성과 기공저항을 측정한 결과는 Fig. 4-2와 같다. 반결구 상추의 광합성은 Ca:K 비율이 0.5 수준까지 증가한 후 감소하였으며, 배양액내 Ca:K 비율 3:6과 4.5:4.5 처리에서 높았다. 기공저항은 Ca:K 비율 1.5:7.5처리에서 가장 컸으며, 광합성이 활발했던 3:6과 4.5:4.5 처리의 기공저항은 가장 적었으며, 6:3 처리에서 다시 증가하였다.

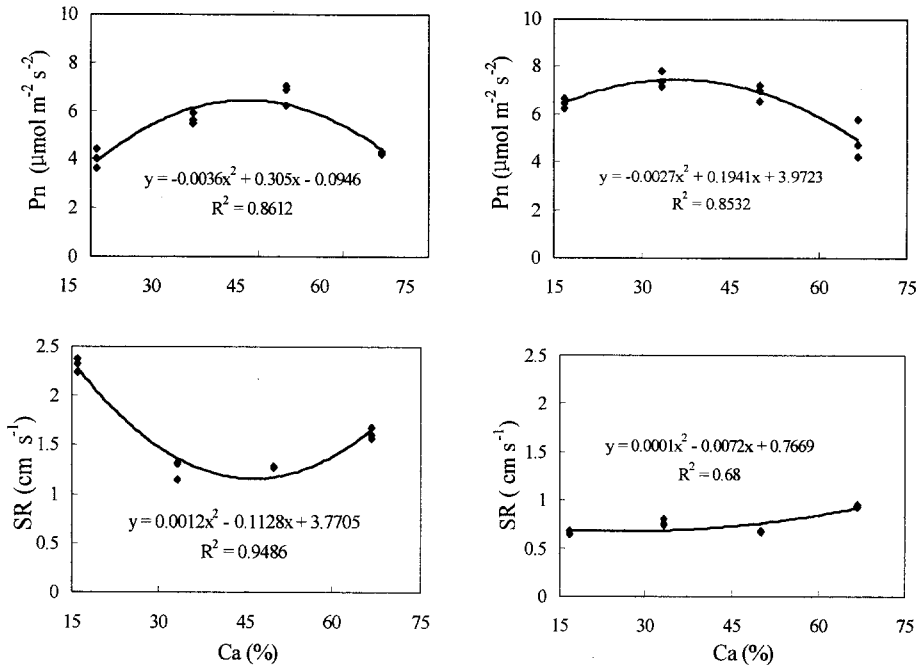


Fig. 4-2. Effect of Ca:K ratios of nutrient solution on photosynthesis (Pn) and stomatal resistance (SR) in butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

즉, 배양액의 칼슘이 부족하거나 많았을 때 기공저항은 높았다. 기공저항의 증가는 식물이 스트레를 받았을 때 반응하는 가스 교환의 첫번째 반응으로써 기공 폐쇄로 기공저항은 증가하고 스트레스가 심해지면 광합성의 저하와 엽육저항이 증가한다. 잎상추의 광합성도 반결구 상추와 같은 경향을 보여 Ca:K 비율 3:6에서 가장 높았고 이후 점차 감소하기 시작하여 6:3처리에서 가장 낮았다. 그러나 기공저항은 Ca:K 증가에 따른 완만한 증가로 처리간 차이가 없었으며, 기공저항외에 세포내 다른 저항요인이 관여하는 것으로 보인다. 잎상추의 낮은 기공저항은 반결구 상추와 다른 품종간 특성 차이로 나타났다.

반결구 상추와 잎상추에서 Ca:K 비율에 따른 증산률과 확산저항은 완전전개잎과 미전개잎을 구분하여 측정하였다(Fig. 4-3). 두 품종 상추에서 증산률은 Ca:K 3:6처리에서 가장 높았으며, 완전전개잎의 증산률이 미전개잎보다 높았다. 잎상추

미전개잎의 증산률은 $6.51 \sim 10.57 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 범위에 있었으며 완전전개잎은 $10.84 \sim 15.82 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 범위로 반결구 상추보다 활발한 증산이 이루어졌다. 미전개잎의 확산저항은 배양액의 Ca:K 비율 3:6과 4.5:4.5처리에서 가장 낮았으며, Ca:K 비율 1.5:7.5에서 가장 높아 기공저항의 결과와 일치하였다. 또한 반결구 상추 미전개잎의 확산저항은 완전전개잎보다 높아 낮은 증산 조직에서 증산률이 낮음을 보였다.

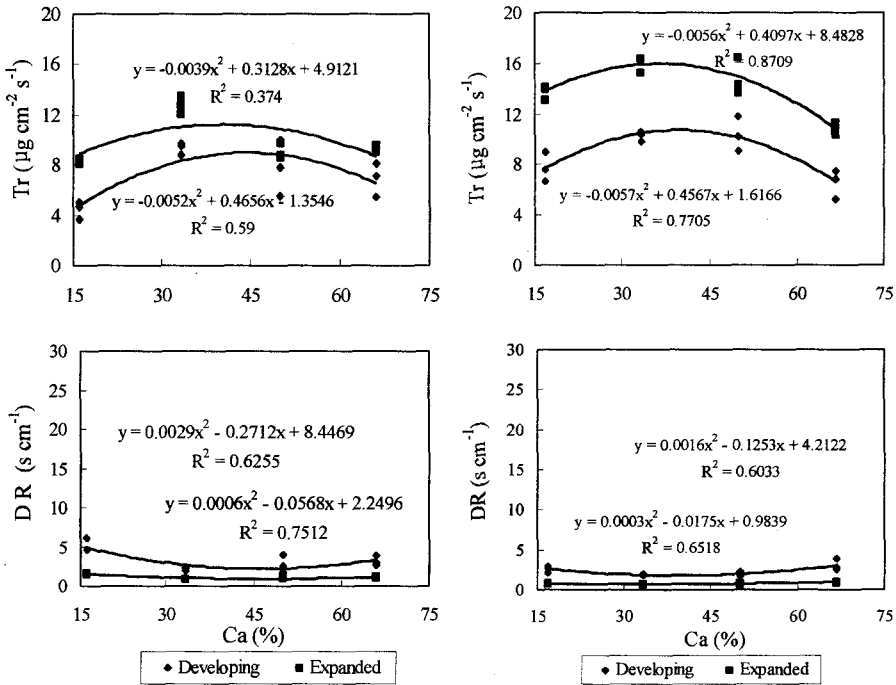


Fig. 4-3. Effect of Ca:K ratios of nutrient solution on transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (DR) in butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

잎상추 확산저항은 반결구 상추와 같은 경향으로 완전전개잎의 확산저항은 처리간 차이가 없었으나 미숙잎의 확산저항은 칼슘 함량이 낮거나(1.5:7.5) 너무 높게(6:3) 조성되었을 때 확산저항이 높았다. 이처럼 반결구 상추 미전개잎의 Ca:K

비율 1.5:7.5 처리에서 확산저항이 가장 높게 나타난 것이 결국 형성기에 잎끝마름이 발생하였던 것과 깊은 관계가 있는 것으로 보인다. 이것은 미전개 잎에서 높은 기공저항과 확산저항으로 인하여 증산률의 억제가 나타나고 결국 칼슘의 이동이 미숙함으로써 전류가 원활하게 일어나지 않아 결핍증이 나타난 것으로 보인다.

배양액의 Ca:K의 부적절한 비율이 광합성과 증산률에 영향을 줌에 따라 세포막의 변화에 미치는 영향을 알아보려고 이온 유출을 측정된 결과(Table 4-31) 배양액의 칼슘이 결핍된 처리는 두 품종 모두 가장 높아 막 변화가 일어남을 알 수 있었다. 그러나 광합성과 증산률이 높았던 3:6 처리보다 칼슘 함량이 적은 1.5:7.5 처리는 이온유출이 많았으나 6:3 처리는 이온 유출이 낮아 배양액내 칼슘 부족에 의한 막투과성의 변화를 논하기는 어려운 것으로 판단되었다. 그러나 칼슘이 없는 처리에서의 높은 이온 유출은 배양액의 양이온 조성 중 Ca:Mg, Ca:NH₄, Ca:(K+Mg), Ca:(K+Mg+NH₄) 비율이 각각 0:5, 0:4, 0:11, 0:12 처리의 결과와도 같았다.

Table 4-31. Effect of Ca:K ratios of nutrient solution on ion leakage of butterhead and leaf lettuce at 3 weeks after treatment.

(unit: dS m ⁻¹)		
Ca:K ratio (me:me)	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
0:9 ^z	0.305 a ^y	0.403 a
1.5:7.5	0.173 bc	0.212 b
3:6 ^x	0.194 b	0.159 bc
4.5:4.5	0.121 c	0.150 c
6:3	0.091 d	0.125 c

^zMeasured 10 days after treatment.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^xStandard solution

Van Goor(1968)는 토마토의 낮은 칼슘 조직에서 조직의 투과성은 칼슘 함량이 높은 조직에 비해 높다고 하여 배양액내 Ca:K 비율에 의한 칼슘 부족은 조직의

막변화를 일으키므로써 물질의 유출을 증가시킬 것으로 보인다. 이와같이 세포내의 칼슘 이온은 세포막 투과성에 영향을 주어 각종 이온의 선택적 흡수를 조절한다.

배양액의 Ca:K 비율간 반결구 상추와 잎상추의 엽록소 함량은 배양액의 칼슘 함량이 높은 6:3 처리에서 높았다(Table 4-32). 반결구 상추는 배양액의 Ca:K 비율에 따른 처리간 차이가 인정되어 배양액내 칼슘 함량이 낮은 1.5:7.5 처리에서 엽록소 함량은 낮았으나 잎상추는 6:3 처리를 제외하고는 처리간 차이가 없는 것으로 보아 배양액의 Ca:K 비율에 따른 엽록소 함량은 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

Table 4-32. Effect of Ca:K ratios of nutrient solution on total chlorophyll content of butterhead and leaf lettuce at 3 weeks after treatment.

(unit: g g⁻¹ Fw.)

Ca:K ratio (me:me)	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
1.5:7.5	0.494 c ^z	0.664 b
3:6 ^y	0.641 a	0.655 b
4.5:4.5	0.593 b	0.661 b
6:3	0.756 a	0.725 a

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^yStandard solution

배양액내 Ca:K 비율에 따른 반결구 상추와 잎상추의 생육은 칼슘 함량이 과, 부족 처리인 1.5:7.5와 6:3 처리에서 엽수의 감소가 두드러짐에 따라 지상부와 지하부 생체중의 감소를 가져왔다(Table 4-33). 배양액의 높은 칼슘을 함유한 6:3 처리의 생육 저하는 뿌리로부터 흡수한 칼슘의 절대량은 감소하지 않고, 칼슘이 뿌리에 과다하게 축적됨에 따라 칼슘과의 길항으로 가리의 흡수를 억제시키므로써 식물체의 생육이 저하된 것으로 보인다.

Table 4-33. Effect of Ca:K ratios of nutrient solution on growth characteristics and incidence of tipburn of butterhead and leaf lettuce^z at 25 days after treatment.

Ca:K ratio (me:me)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)		Tipburn (%)
				Shoot	Root	Shoot	Root	
Butterhead lettuce 'Omega'								
0:9	-	-	-	-	-	-	-	100
1.5:7.5	20.3	18.8	36.0 ab ^y	103.5 b	14.4 b	4.68 b	1.17 ab	25
3:6 ^x	18.0	17.8	41.5 a	119.0 a	18.5 a	5.35 a	1.52 a	0
4.5:4.5	21.3	18.3	40.5 a	109.5 a	15.3ab	4.88 b	1.19 ab	0
6:3	21.8	19.3	31.5 b	100.5 b	13.2 b	5.03 ab	0.92 b	0
Leaf lettuce 'Grand Rapids'								
0:9	-	-	-	-	-	-	-	100
1.5:7.5	24.5	19.6 ab	24.5 b	109.3 b	22.5 b	7.35 c	1.57 ab	0
3:6	22.3	22.8 a	31.5 a	149.9 a	34.0 a	11.5 a	1.81 a	0
4.5:4.5	20.0	25.5 b	25.5 b	112.0 b	26.8 b	7.86 b	1.51 ab	0
6:3	23.8	16.5 b	23.5 b	104.4 b	24.0 b	7.26 c	1.26 b	0

^zTransplanted on May 17 and harvested on June 16, 1998.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^xStandard solution

Yang 등(1996)은 배양액의 칼슘 적정 농도보다 많거나 적을 때 식물체내 가리 함량은 감소하는 경향을 보였으며, Hohjo 등(1995)도 배양액의 칼슘 농도 증가에 따라 식물체내 칼슘 함량은 증가하나 가리, 마그네슘 함량은 감소하여 칼슘과 가리, 마그네슘은 길항 관계를 보였다. 그러나 본 실험에서는 식물체 무기 이온 분석이 이루어지지 않아 정확한 길항 관계를 설명하기는 어려우나 배양액의 칼슘 농도가 적정 범위를 벗어났을 때 생육의 감소가 나타남에 따라 양이온간의 길항작용이 생육 저하를 가져온 것으로 생각되었다. 또한 품종에 따른 칼슘 장애는 Nakaya 등(1995)이 배양액의 K/Ca 비가 증가함에 따라 토마토 'Momotaro'는 영향을 받지 않았으나 'June Pink'는 생육저하와 함께 배꼽썩음과가 발생함에 따라 품종에 따라 칼슘 생리 장애 정도는 다름을 보였다. 본 실험도 이미 식물공장에 적합한 품종으로 선발되었으나 잎상추는 형태적 특성과 함께 유전적인 특성이 함께 작용하여 잎끝마름에 강한 것으로 생각되었다.

나) 배양액내 Ca:Mg 비율

마그네슘은 칼슘과 같은 2가 양이온으로 상추의 광합성, 생육 및 잎끝마름 발생에 미치는 영향을 알아보려고 실험을 수행하였다.

반결구 상추 Ca:Mg 비율에 따른 광합성은 배양액내 칼슘 함량이 증가함에 따라 완만히 증가하여 처리간 차이가 없었으나 기공저항은 급격히 감소했다(Fig. 4-4). 그러나 잎상추의 광합성은 배양액내 Ca:Mg 비율 3:2인 칼슘 60%에서 급격히 증가하여 $7.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$ 수준으로 반결구 상추에 비해 1.8배 높아 품종간의 차이를 보였으며, 적정 배양액 조성 농도에서 광합성 속도가 빠름을 확인했다. 또한 반결구 상추의 광합성은 처리간 차이가 없었으나 두 품종 모두 기공저항은 적정 배양액 조성 농도보다 칼슘 함량이 부족했을 때 가스교환의 출입구인 기공의 변화를 가져왔다.

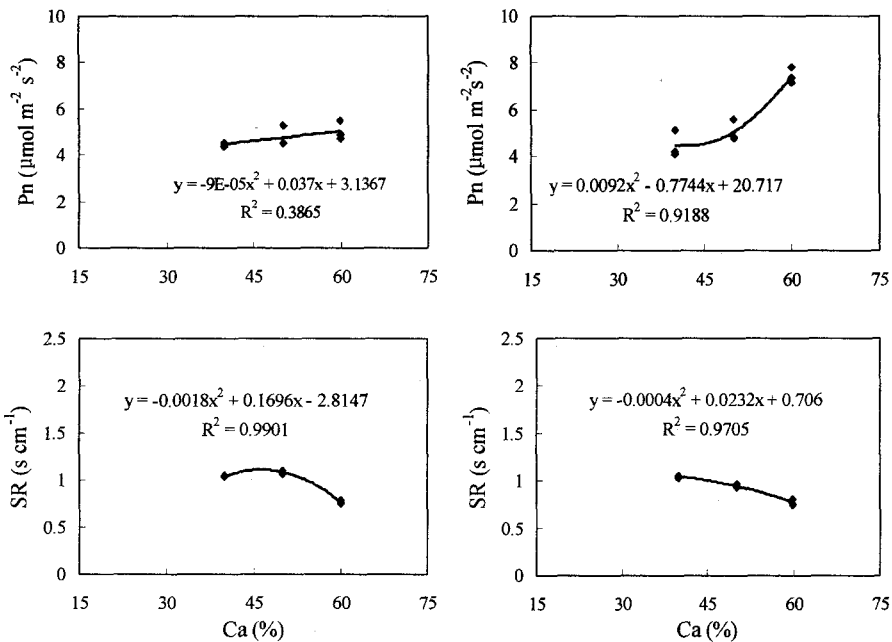


Fig. 4-4. Effect of Ca:Mg ratios of nutrient solution on photosynthesis (Pn) and stomatal resistance (SR) in butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

두 품종 상추의 Ca:Mg 비율에 따른 증산률은 배양액내 칼슘 함량이 증가함에 따라 증가하여 완전 전개잎과 미전개잎 모두 Ca:Mg 비율 3:2 처리에서 가장 높았다(Fig. 4-5). 그러나 반결구 상추 미전개잎의 증산률은 완전전개잎과 같은 경향을 보인 반면 잎상추의 미전개잎 증산률은 $10.5 \mu\text{g cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 최대를 나타냈다. 두 품종 완전전개잎의 확산저항은 극히 낮았던 반면 반결구 상추 미전개잎 확산 저항은 칼슘 함량이 낮은 Ca:Mg 비율 2:3 처리에서 가장 높았다. 이 처리는 기공저항도 컸던 처리로 잎끝마름이 25% 발생하였으며, 다른 처리에 비해 생육 저하를 가져왔다. 이는 칼슘과 마그네슘의 부적절한 비율은 기공의 변화와 함께 생육과 품질에 미치는 영향이 큰 것을 보여주었다.

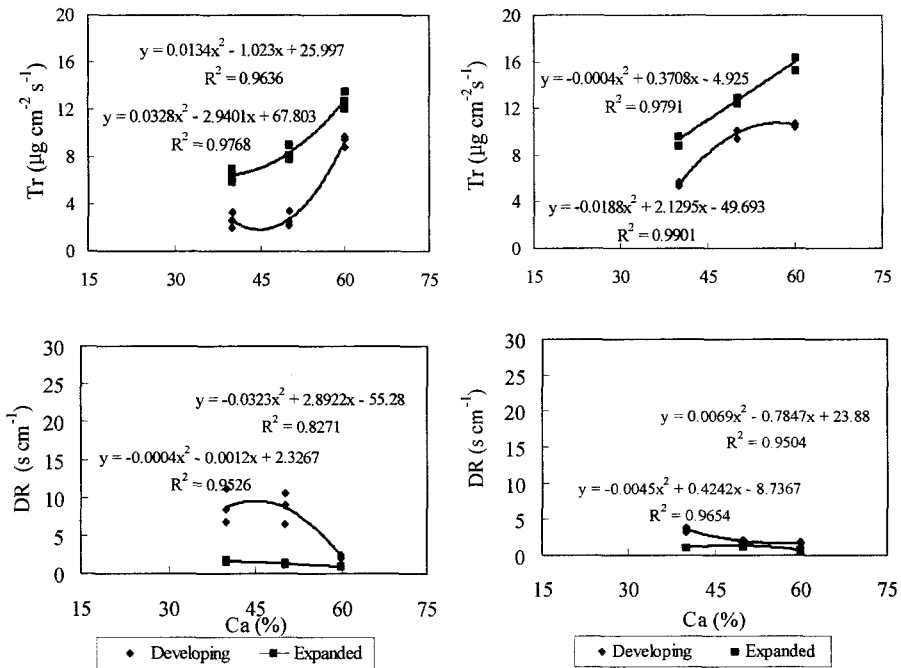


Fig. 4-5. Effect of Ca:Mg ratios of nutrient solution on transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (DR) in butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

배양액의 Ca:Mg 비율에 따른 두 품종 상추의 이온 유출은 칼슘이 결핍된 처리에서 높았으며, 반결구 상추는 2:3 처리에서, 잎상추는 2.5:2.5 처리에서 낮았다 (Table 25). 이는 칼슘이 결핍된 처리에서 이온 유출이 증가함에 따라 세포막 변화를 확인할 수 있으나 Ca:Mg 비율에 따른 뚜렷한 경향을 찾을 수는 없었다.

Table 4-34. Effect of Ca:Mg ratios of nutrient solution on ion leakage of butterhead and leaf lettuce at 3 weeks after treatment

(unit: dS m⁻¹)

Ca:Mg (me:me)	Butterhead lettuce	Leaf lettuce
	'Omega'	'Grand Rapids'
0:5 ^z	0.840 a ^y	0.403 a
2:3	0.124 c	0.124 bc
2.5:2.5	0.171 bc	0.115 c
3:2 ^x	0.194 b	0.159 b

^zMeasured 10 days after treatment.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level. ^xStandard solution.

두 품종 상추의 엽록소 함량은 Ca:Mg 2.5:2.5 처리에서 가장 높았다. 두 품종 모두 배양액의 Ca:Mg 비율에 다른 차이가 인정되었으며, 잎상추에 비해 반결구 상추에서는 처리간 큰 차이를 보여 Ca:K 비율 결과와 같은 경향을 보였다 (Table 4-35). 그러나 마그네슘이 엽록소 구성 원소이지만 배양액내 마그네슘 함량 증가가 엽록소 함량을 증가시킨 것은 아닌 것으로 나타나 이는 칼슘과의 양이온 길항 작용에 따른 차이로 생각되어졌다.

배양액의 Ca:Mg 비율에 따른 반결구 상추와 잎상추의 생육은 Ca:Mg 비율 0:5 처리가 처리 5일째부터 잎의 엽반 현상을 동반하면서 황화되기 시작하여 극심한 생육 지연과 함께 뿌리부가 갈색으로 피해를 받았다. 칼슘 결핍구의 배양액 pH는 4.5 내외로 칼슘 부족에 따른 마그네슘 과잉과 함께 근권의 낮은 pH가 극심한 생육 저하로 생육 결과를 얻지 못했으며, 두 품종 모두 100% 잎끝마름이 발생하였다 (Table 4-36).

Table 4-35. Effect of Ca:Mg ratios of nutrient solution on total chlorophyll content of butterhead and leaf lettuce at 3 weeks after treatment.

(unit: g g⁻¹ Fw.)

Ca:Mg (me:me)	Butterhead lettuce	Leaf lettuce
	'Omega'	'Grand Rapids'
2:3	0.454 c ^z	0.687 ab
2.5:2.5	0.829 a	0.746 a
3:2 ^y	0.641 b	0.655 b

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^yStandard solution

Table 4-36. Effect of Ca:Mg ratios of nutrient solution on growth characteristics and incidence of tipburn of butterhead and leaf lettuce^z at 25 days weeks after treatment.

Ca:Mg ratio (me:me)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)		Tipburn (%)
				Shoot	Root	Shoot	Root	
				Butterhead lettuce 'Omega'				
0:5	-	-	-	-	-	-	-	100
2:3	19.5	13.7	33.0 b ^y	89.6 b	10.5 b	3.78 b	0.82 b	25
2.5:2.5	18.3	17.2	33.5 b	96.1 b	12.3 b	4.41 b	0.94 b	0
3:2 ^x	18.0	17.8	41.5 a	119.0 a	18.5 a	5.35 a	1.52 a	0
Leaf lettuce 'Grand Rapids'								
0:5	-	-	-	-	-	-	-	100
2:3	24.0	18.9 b	20.0 b	75.4 c	14.8 c	5.50 c	0.91 c	0
2.5:2.5	22.0	19.3 b	22.7 b	96.4 b	23.0 b	7.74 b	1.21 b	0
3:2	22.3	22.8 a	31.5 a	149.9 a	34.0 a	11.5 a	1.81 a	0

^zTransplanted on May 17 and harvested on June 16, 1998.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^xStandard solution

배양액의 Ca:Mg 비율에 따른 반결구 상추의 최대 엽장과 엽폭간에는 처리간 차이가 없었으나 엽수 차이가 생체중의 처리간 차이를 가져왔다. Ca:Mg 2:3 처리는 Ca:K 비율 처리에서 칼슘 부족구인 1.5:7.5처리의 생육량보다 낮은 것으로 칼슘과 마그네슘간의 길항이 생육 저하를 가져온 것으로 보이며, 반결구 상추에서만 잎끝마름이 25% 발생하였다. 잎상추의 생육도 반결구 상추와 같이 0:5 처리는 잎의 형태가 결구가 형성되지 않는 형태이지만 엽반 현상으로 인한 극심한 생육 저하가 나타나면서 10일째부터 고사되기 시작되었다. 그러나 배양액의 Ca :Mg 처리

비율간 잎상추의 잎끝마름은 발생하지 않았으나 부적절한 비율인 2:3과 2.5:2.5 처리는 엽수의 감소와 함께 생육 저하를 보였으며, 3:2 처리는 생육량이 가장 많았다. 마그네슘은 엽록체내에서 마그네슘 킬레이트로 존재하면서 엽록소 분자의 일부분이며, ATP와 효소 분자간에 교량 역할을 하면서 인산화 반응을 활성화시키는 많은 효소들의 보조인자로 작용한다. 따라서 칼슘과 마그네슘의 길항작용이 다른 양이온 비율 처리에서 보다 낮은 생육 저하를 가져온 것으로 보이며, 이와 같은 결과는 Sonneveld와 Voogt(1991)의 결과와도 일치하였다.

다) 배양액내 Ca:NH₄ 비율

배양액의 Ca:NH₄ 비율에 의한 반결구 상추와 잎상추의 광합성은 배양액 조성 비율에 따른 차이가 없었다(Fig. 4-6). 반결구 상추 기공저항은 Ca:NH₄ 비율 1:3 처리에서 높고 3:1 처리에서 낮아 Ca:Mg 비율간 결과와 같은 경향을 보였으나 잎상추는 Ca:NH₄ 비율에 따른 기공저항의 변화가 없었다.

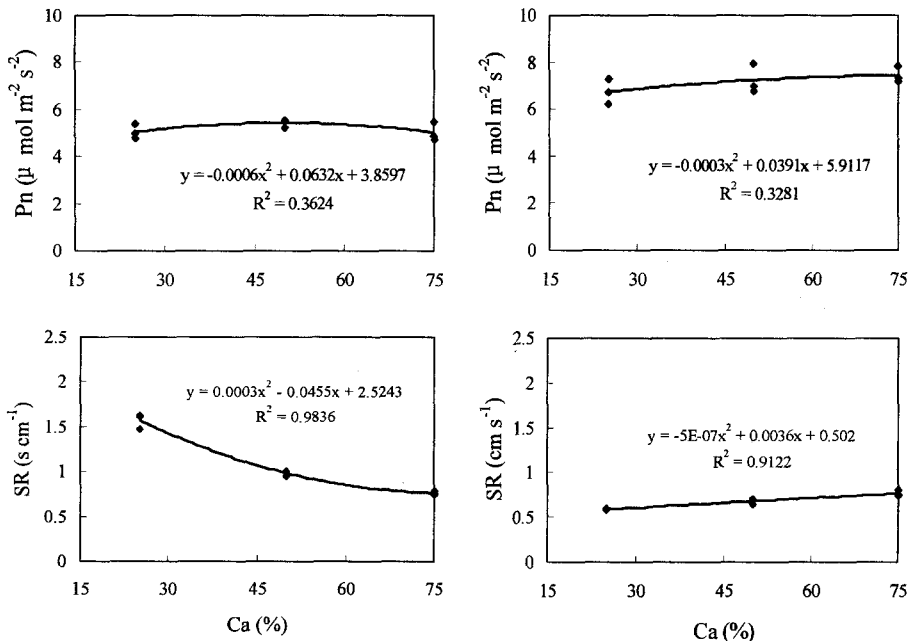


Fig. 4-6. Effect of Ca:NH₄ ratios of nutrient solution on photosynthesis (Pn) and stomatal resistance (SR) in butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

배양액의 Ca:NH₄ 비율에 따른 반결구 상추와 잎상추의 증산률과 확산저항은 같은 경향을 나타냈다(Fig. 4-7). Ca:NH₄ 1:3 처리는 NH₄ 과잉에 따른 칼슘 부족이 생육 저하로 나타나 반결구 상추에서는 결구 형성이 이루어지지 않음으로써 미전 개잎이 외부로 노출됨에 따라 Ca:K 1.5:7.5, Ca:Mg 2:3 처리의 증산률보다 높았다. 잎상추의 증산률은 반결구 상추보다 높았으나, 확산저항은 극히 낮아 증산이 반결구 상추보다 활발히 이루어짐을 보였다.

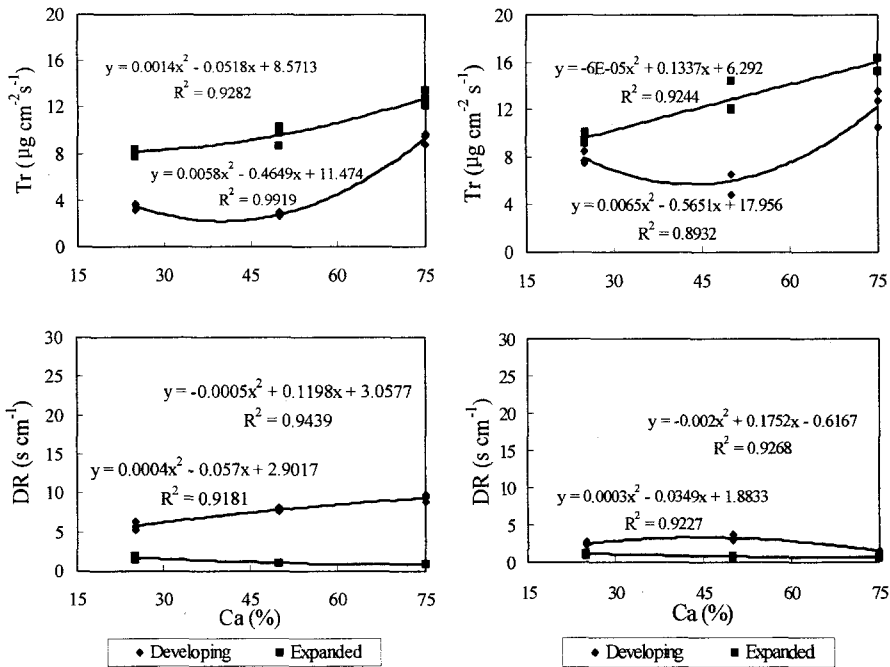


Fig. 4-7. Effect of Ca:NH₄ ratios of nutrient solution on transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (DR) in butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

배양액의 Ca:NH₄ 비율에 따른 두 품종 상추의 이온 유출은 NH₄ 과잉 처리에서 높아 대조구인 3:1 처리에서 보다 3배이상 높았다. 한편 반결구 상추의 칼슘을 제외한 처리간에는 차이가 없었으나 잎상추는 2:2 처리에서 낮았다(Table 4-37). 배양액의 칼슘 결핍은 막투과성을 손상시켜 세포의 확산성 화합물의 보존을 어렵게 함으로써 막에서의 이온 유출을 증가시키고 점차 막의 붕괴를 가져오는 것으로 생각된다. 즉 칼슘 공급이 제한되면 다가 페놀이 산화되어 퀴논으로 변하고 이

것이 아미노산, 단백질과 결합하여 칼슘 결핍 조직은 black melanin compound를 형성하는 것으로 보고되고 있다(Marshner, 1995)

배양액의 Ca:NH₄ 비율에 따른 반결구 상추의 엽록소 함량은 1:3 처리와 3:1 처리에서 높았으나 잎상추는 배양액의 칼슘 함량이 낮게 조성된 1:3 처리의 엽록소 함량이 3:1 처리에서 보다 2.1배나 높아 엽형에 따른 차이를 보였다(Table 4-38). 배양액의 Ca:NH₄ 1:3 처리는 암모늄 과잉 처리로 지하부 생육 저하가 지상부 생육을 억제시키면서 엽색이 짙어지는 것이 관찰되었다. 이는 높은 EC로 인한 근권의 삼투포텐셜 저하가 상추의 생육저하와 함께 엽색이 짙어진 것과 같은 현상으로 엽록소 함량이 높았던 결과와 같았다.

Table 4-37. Effect of Ca:NH₄ ratios of nutrient solution on ion leakage of butterhead and leaf lettuce at 3 weeks after treatment.

Ca:NH ₄ ratio (me:me)	(unit: dS m ⁻¹)	
	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
0:4 ^z	0.470 a ^y	0.406 a
1:3	0.119 b	0.174 b
2:2	0.093 b	0.113 c
3:1 ^x	0.135 b	0.136 bc

^zMeasured 10 days after treatment.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^xStandard solution

Table 4-38. Effect of Ca:NH₄ ratios of nutrient solution on total chlorophyll content of butterhead and leaf lettuce at 3 weeks after treatment.

Ca:NH ₄ ratio (me:me)	(unit: g g ⁻¹ Fw.)	
	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
1:3	0.672 a ^z	1.009 a
2:2	0.510 b	0.671 b
3:1 ^y	0.641 a	0.477 c

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^yStandard solution

배양액내 Ca:NH₄ 비율 1:3 처리는 NH₄ 과잉으로 결구의 형성이 이루어지지 않을 만큼의 생육 저하가 눈에 띄게 나타났음에도 불구하고 잎끝마름이 25% 발생했다(Table 4-39). 이는 결구형성에 의한 증산률 저하가 아닌 NH₄ 과잉으로 인한 잎끝마름이 발생된 것으로 생각되며 뿌리가 갈변화되어 심한 손상을 받은 것이 관찰되었다. 반결구 상추와 잎상추 1:3 처리는 Ca:Mg 2:3 처리의 생육량보다 낮은 것으로 본 실험의 무기 양이온 비율 결과 중 가장 낮은 생육량을 나타냈다. 즉, 암모늄 과잉으로 인한 뿌리의 심한 갈변은 지상부 생육 저하를 가져온 가장 큰 원인으로 작용하였음을 보였다. 그러나 잎상추는 0:5 처리를 제외하고는 잎끝마름이 발생하지 않아 다른 무기양이온 비율 처리의 결과와 같았다.

Table 4-39. Effect of Ca:NH₄ ratios of nutrient solution on growth characteristics and incidence of tipburn of butterhead and leaf lettuce^z at 25 days after treatment.

Ca:NH ₄ ratio (me:me)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)		Tipburn (%)
				Shoot	Root	Shoot	Root	
Butterhead lettuce 'Omega'								
0:4	-	-	-	-	-	-	-	100
1:3	19.7	13.6 b ^y	27.0 c	64.3 b	11.0	3.19 b	0.99 b	25
2:2	19.9	17.2 a	34.5 b	105.2 a	14.6	4.85 a	1.15 b	0
3:1 ^x	18.0	17.8 a	41.5 a	119.0 a	18.5	5.25 a	1.52 a	0
Leaf lettuce 'Grand Rapids'								
0:4	-	-	-	-	-	-	-	100
1:3	17.7 b	15.8 b	15.0 c	71.7 c	17.9 b	4.78 b	1.49 b	0
2:2	25.2 a	17.8 b	25.0 b	110.2 b	32.5 a	10.32 a	1.79 a	0
3:1	22.3ab	22.8 a	31.5 a	149.9 a	34.0 a	11.50 a	1.81 a	0

^zTransplanted on May 17 and harvested on June 16, 1998.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^xStandard solution

Hohjo 등(1995)은 배양액의 NH₄ 비가 증가함에 따라 토마토 배꼽썩음과 발생은 높았으며, 칼슘과 마그네슘의 흡수가 감소되었음을, Kozai 등(1992)도 NH₄ 과잉에

의한 잎끝마름이 가장 심한 것으로 보고하였다. 그러나 잎상추는 Ca:NH₄ 비율 처리간 생육 차이가 뚜렷했으며, 1:3 처리와 같은 낮은 생육량에서도 잎끝마름이 발생하지 않아 형태적 차이와 함께 잎끝마름에 강한 유전적 특성이 있는 것으로 생각된다.

라) 배양액내 Ca:(K+Mg) 비율

배양액내 Ca:(K+Mg) 비율에 따른 반결구 상추와 잎상추의 광합성은 Ca:(K+Mg) 비율 2:9에서 가장 낮다가 4:7과 5.5:5.5 비율에서 증가한 후 배양액내 칼슘이 많이 조성된 7:4 처리에서 다시 감소하여 Ca:K 비율에 의한 광합성 결과와 비슷했다. 두 품종 상추의 기공 저항은 중간 차이를 보임으로써 반결구 상추의 배양액내 칼슘 함량이 많거나 적은 처리에서 높은 반면, 잎상추는 처리간 차이를 보이지 않았다(Fig. 4-8).

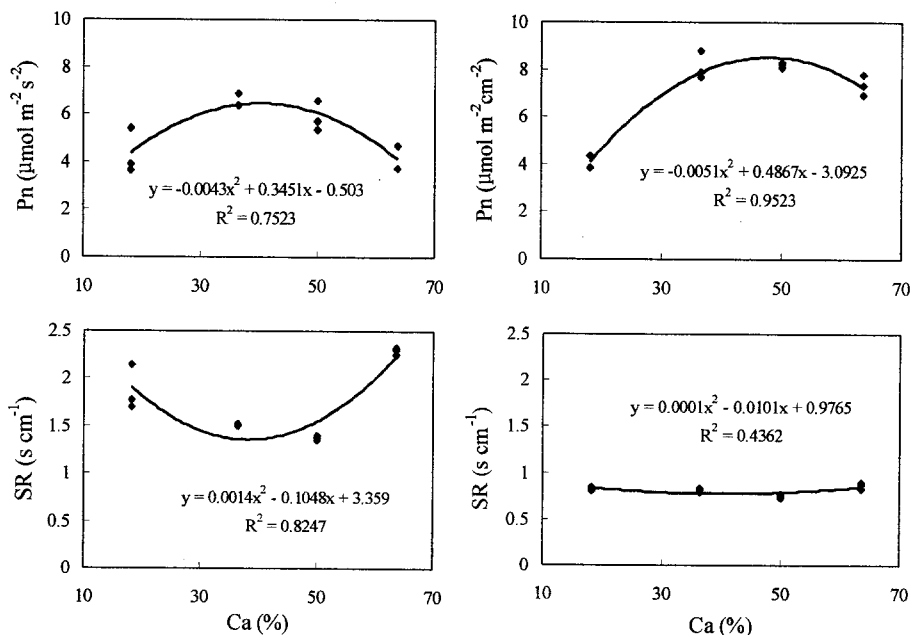


Fig. 4-8. Effect of Ca:(K+Mg) ratios of nutrient solution on photosynthesis (Pn) and stomatal resistance (SR) in butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

두 품종 상추의 증산률은 Ca:(K+Mg) 비율에 따른 뚜렷한 차이는 없었으나 Ca:(K+Mg) 비가 4:7과 5.5:5.5 처리에서 높은 경향을 보였다(Fig. 4-9). 반결구 상추 완전 전개잎의 증산률은 $8.05 \sim 10.28 \mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 수준으로 Ca:(K+Mg) 비율에 의한 차이가 없었다. 미전개잎의 증산률도 Ca:(K+Mg) 비율에 따른 처리간 차이가 크지 않았다. 그러나 칼슘 함량이 많은 7:4 처리에서 증산률은 감소하는 경향을 보였다. 잎상추의 완전전개잎과 미전개잎의 증산률도 칼슘 함량이 적거나 많은 2:9와 7:4 처리에서 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 상추의 형태적 특성에 따라 반결구 상추에 비해 잎상추의 증산률은 활발했으며, 확산저항은 적게 나타났다.

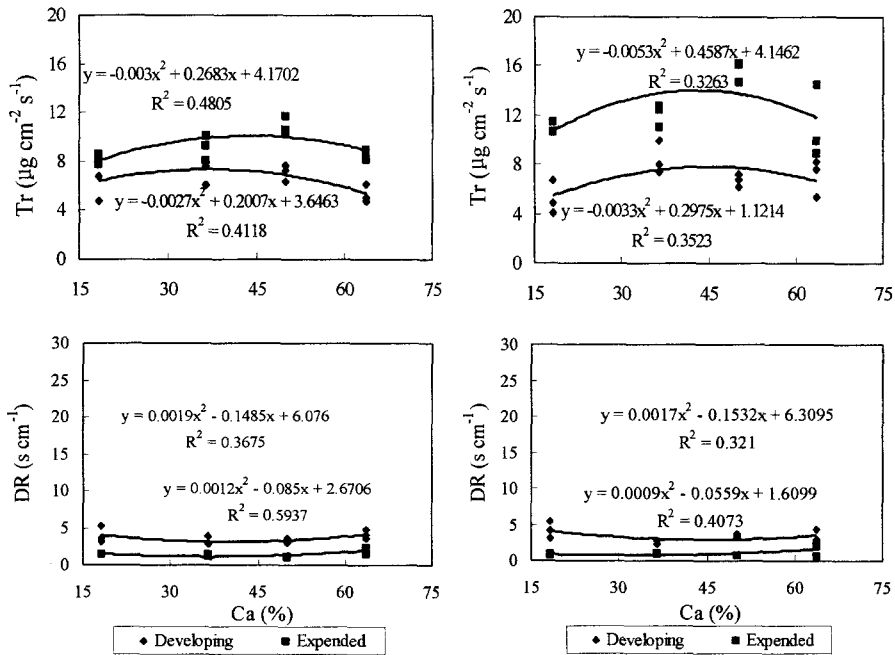


Fig. 4-9. Effect of Ca:(K+Mg) ratios of nutrient solution on transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (DR) in butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

배양액내 Ca:(K+Mg) 비율에 따른 두 품종 상추의 이온 유출은 칼슘 결핍구에

서 가장 높아 4.2~5.5배 높았다. 반결구 상추 이온 유출은 칼슘 결핍구를 제외한 처리간에도 차이가 인정되어 4:7 처리에서는 이온 유출이 적었으나 잎상추는 처리간 차이가 없었다(Table 4-40). Ca:(K+Mg) 비율에 따른 엽록소 함량은 두 품종 모두 7:4 처리에서 가장 낮았다(Table 4-41).

Table 4-40. Effect of Ca:(K+Mg) ratios of nutrient solution on ion leakage of butterhead and leaf lettuce at 3 weeks after treatment.

(unit: dS m⁻¹)

Ca:(K+Mg) ratio (me:me)	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
0:11 ^z	0.500 a ^y	0.427 a
2:9	0.096 bc	0.106 b
4:7 ^x	0.090 c	0.102 b
5.5:5.5	0.131 b	0.123 b
7:4	0.098 bc	0.113 b

^zMeasured 10 days after treatment.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^xStandard solution

Table 4-41. Effect of Ca:(K+Mg) ratios of nutrient solution on total chlorophyll content of butterhead and leaf lettuce at 3 weeks after treatment.

(unit: g g⁻¹ Fw.)

Ca:(K+Mg) ratio (me:me)	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
2:9	0.446 ab ^z	0.768 a
4:7 ^y	0.562 a	0.765 a
5.5:5.5	0.595 a	0.743 a
7:4	0.362 b	0.644 b

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^yStandard solution

배양액의 Ca:(K+Mg) 비율에 의한 두 품종 상추의 생육은 칼슘 결핍에 의한 (K+Mg) 과잉 처리에서만 잎끝마름이 발생하였으며, 나머지 처리에서는 발생하지 않았다(Table 4-42). Ca:(K+Mg) 2:9 처리는 두 품종 모두 생육 저하는 나타났으나 Ca:K, Ca:Mg, Ca:NH₄ 비율이 각각 1.5:7.5, 2:3, 1:3 처리와 같은 칼슘 부족구에서는 미약하나마 반결구 상추 잎끝마름이 발생한 것과는 다른 결과를 보였다. 또한 반결구 상추에서 4:7과 5.5:5.5 처리간에는 생체중의 차이가 없었으나 결구 형성에 따른 외관적 상품 가치가 5.5:5.5 처리에서 높아 가리와 마그네슘이 복합으로 처리됨에 따른 결과로 보인다. 잎상추는 2:9 처리를 제외하고는 처리에 따른 생체중은 차이가 없었다.

Table 4-42. Effect of Ca:(K+Mg) ratios of nutrient solution on growth characteristics and incidence of tipburn of butterhead and leaf lettuce^z at 25 days after treatment.

Ca:(K+Mg) ratio (me:me)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)		Tipburn (%)
				Shoot	Root	Shoot	Root	
Butterhead lettuce 'Omega'								
0:11	-	-	-	-	-	-	-	100
2:9	17.3	18.3	37.5 b ^y	107.0 b	13.2 b	4.34 c	0.96	0
4:7 ^x	18.7	18.3	39.0 b	134.5 a	16.5 a	5.84 a	1.11	0
5.5:5.5	17.0	19.8	41.0 a	132.7 a	14.8 b	5.09 b	0.98	0
7:4	18.2	19.8	41.5 a	121.2 a	13.8 b	4.58 c	0.97	0
Leaf lettuce 'Grand rapids'								
0:11	-	-	-	-	-	-	-	100
2:9	23.9	19.8 b	23.0 b	90.0 b	20.6 c	8.0 b	1.28 b	0
4:7	22.9	19.5 b	23.0 b	135.5 a	29.3 ab	9.8 a	1.45 a	0
5.5:5.5	24.7	24.8 a	36.0 a	139.6 a	32.1 a	11.1 a	1.40 a	0
7:4	25.6	20.8 b	34.5 a	132.5 a	25.8 b	10.4 a	1.49 a	0

^zTransplanted on May 17 and harvested on June 16, 1998.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^xStandard solution

Van der Boon(1980)은 사과잎의 (K+Mg)/Ca 비가 사과 고두병 발생의 지침으로 제시할 만큼 칼슘과 가리, 마그네슘의 길항 관계는 매우 큰 영향을 줄 수 있으나 본 실험에서 2:9 처리에서만 생육 저하를 관찰할 수 있었던 것은 총 무기이온의 당량은 변화시키지 않고 처리됨에 따라 양이온간의 서로 상호적인 작용이 관여함에 따라 반결구 상추는 칼슘 함량이 부족했을 때 잎끝마름이 발생하지 않았던 것으로 보이며, 두 품종 모두 칼슘 함량이 많은 처리에서 생육간 차이가 뚜렷하지 않았던 것으로 생각된다.

마) 배양액내 Ca:(K+Mg+NH₄) 비율

반결구 상추의 Ca:(K+Mg+NH₄) 비율에 따른 광합성은 Ca:(K+Mg+NH₄) 비율 2:10에서 7.3 μmol m⁻² s⁻²로 높다가 칼슘 함량이 증가함에 따라 감소 후 Ca:(K+Mg+NH₄) 비율 6:6 처리에서 회복되어 증가하는 경향을 나타냈다. 잎상추의 광합성은 Ca:(K+Mg+NH₄) 6:6 처리에서 가장 높았으나 처리간 차이는 없었다 (Fig. 4-10).

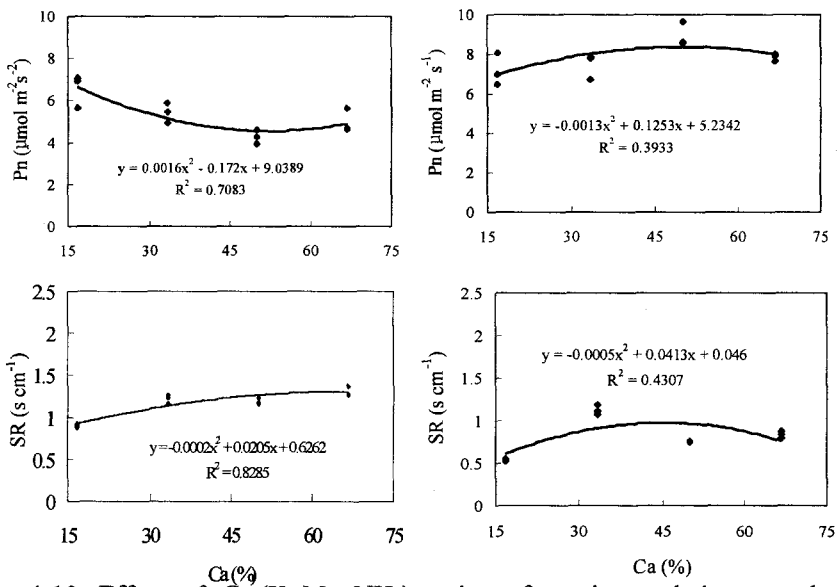


Fig. 4-10. Effect of Ca:(K+Mg+NH₄) ratios of nutrient solution on photo-synthesis (Pn) and stomatal resistance (SR) in butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

배양액의 Ca:(K+Mg+NH₄) 비율에 따른 두 품종 상추의 완전 전개잎 증산률은 4:8과 6:6 처리에서 가장 높았다. 반결구 상추 미전개잎의 증산률이 칼슘 비율에 따른 처리간 차이가 없었으나 잎상추는 칼슘 비율 증가에 따라 계속 증가하였다. 전개잎의 확산 저항은 Ca:(K+Mg+NH₄) 비율 2:10 처리는 미전개잎에 비해 높았으나 점차 감소하여 8:4 처리는 미전개잎과 완전전개잎의 확산저항은 같은 수준이 되었다(Fig. 4-11).

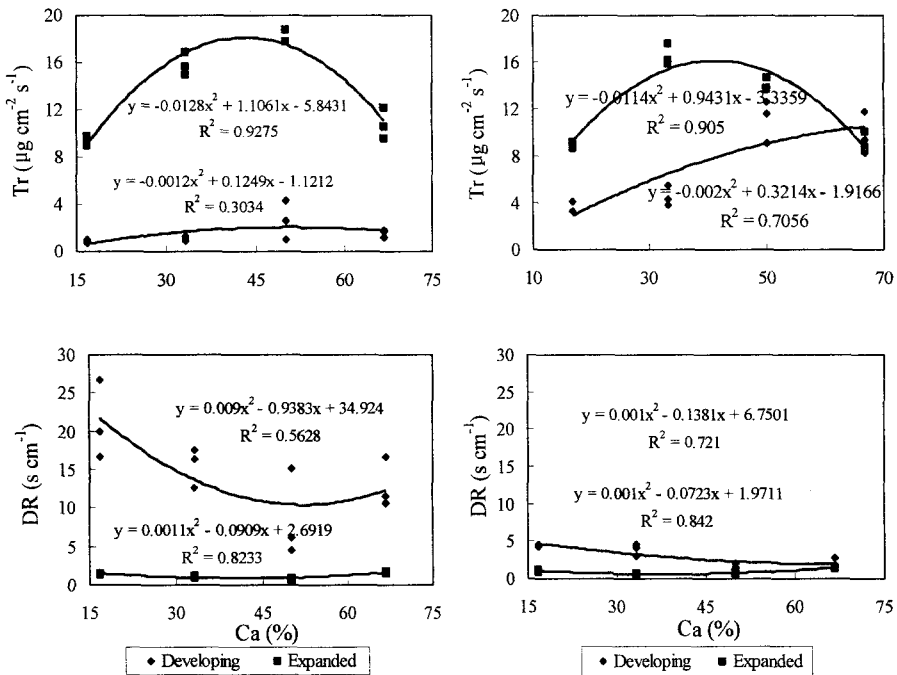


Fig. 4-11. Effect of Ca:(K+Mg+NH₄) ratios of nutrient solution on transpiration rate (Tr) and diffusive resistance (DR) in butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) at 25 days after treatment.

배양액의 Ca:(K+Mg+NH₄) 비율에 따른 두 품종 상추의 이온 유출은 칼슘 결핍에서 가장 많았으며, 4:8 처리에서 낮았다(Table 4-43). 반결구 상추 엽록소 함량은 배양액의 칼슘 함량이 낮은 2:10 처리에서 높은 반면 잎상추는 처리간 차이를 보이지 않았다(Table 4-44).

Table 4-43. Effect of Ca:(K+Mg+NH₄) ratios of nutrient solution on ion leakage of butterhead and leaf lettuce at 3 weeks after treatment.

(unit: dS m ⁻¹)		
Ca:(K+Mg+NH ₄) ratio (me:me)	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
0:12 ^z	0.360 a ^y	0.321 a
2:10	0.197 c	0.135 bc
4:8 ^x	0.160 c	0.110 c
6:6	0.164 c	0.163 b
8:4	0.318 b	0.132 bc

^zMeasured 10 days after treatment.

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

^xStandard solution

Table 4-44. Effects of Ca:(K+Mg+NH₄) ratios in nutrient solution on total chlorophyll content of butterhead and leaf lettuce at 3 weeks after treatment.

(unit: g g ⁻¹ Fw.)		
Ca:(K+Mg+NH ₄) ratio (me:me)	Butterhead lettuce 'Omega'	Leaf lettuce 'Grand Rapids'
2:10	0.549 a ^z	0.692 a
4:8 ^y	0.336 b	0.738 a
6:6	0.347 b	0.694 a
8:4	0.422 ab	0.729 a

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

^yStandard solution

반결구 상추 Ca:(K+Mg+NH₄) 비율에 따른 생육도 칼슘과 다른 무기이온 처리에서와 같이 Ca:(K+Mg+NH₄) 비율 0:10 처리는 잎끝마름이 100% 발생하였으며, 2차 감염으로 인한 잿빛곰팡이병이 발생하였다(Table 4-45). Ca:(K+Mg+NH₄) 비율 2:10 처리는 두 품종 모두 생체중의 감소가 나타났으며, 잎끝마름은 반결구 상추에서만 33% 발생하여 종간 차이를 보였다. 또한 2:10 처리를 제외하고는 생육간 유의적 차이가 없었으나 4:8 처리에서 높은 경향을 보였다. 이러한 칼슘 과잉 처리에서 생육간 차이가 없었던 것은 Ca:(K+Mg) 비율의 결과와 같이 양이온간의 작용은 가리, 마그네슘, 암모늄과 같이 단일 이온으로 처리되었을 때는 길항작용으로 반응할 수 있지만 복합 처리됨으로써 길항작용만이 아닌 상호적인 작용이 함

계 작용하는 것으로 생각되었다.

Table 4-45. Effect of Ca:(K+Mg+NH₄) ratios of nutrient solution on growth characteristics and incidence of tipburn of butterhead and leaf lettuce^z at 25 days after treatment.

Ca:(K+Mg+NH ₄) ratio (me:me)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf number	Fresh weight (g plant ⁻¹)		Dry weight (g plant ⁻¹)		Tipburn (%)
				Shoot	Root	Shoot	Root	
Butterhead lettuce 'Omega'								
0:12	-	-	-	-	-	-	-	100
2:10	16.0 b ^y	18.8 b	43.5 ab	104.8 b	12.8	5.59 b	0.97 b	33
4:8 ^x	20.8 a	20.0 a	45.7 a	145.5 a	14.8	6.19 a	1.12 a	0
6:6	17.0 ab	18.5 b	42.0 b	133.9 a	14.6	5.78 ab	1.00 b	0
8:4	14.5 b	19.5 a	44.0 ab	137.3 a	14.1	5.24 b	0.97 b	0
Leaf lettuce 'Grand Rapids'								
0:12	-	-	-	-	-	-	-	100
2:10	25.0	19.9	28.5	111.9 b	22.4	8.64 b	0.98 b	0
4:8	24.8	21.0	31.0	141.9 a	23.1	9.80 a	1.20 ab	0
6:6	25.8	20.8	30.0	137.5 a	24.2	10.04 a	1.45 a	0
8:4	24.8	21.1	28.5	130.7 a	23.2	9.45 a	1.10 b	0

^zTransplanted on May 17 and harvested on June 16, 1998.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test, 5% level.

^xStandard solution

이상의 Ca과 양이온간의 비율이 반결구 상추와 잎상추의 광합성과 증산률에 미치는 영향은 적정 배양액 비율 처리에서 가장 활발한 것은 아니었으나, 높은 경향을 나타냈다. 또한 이온 유출은 결핍구를 제외한 칼슘과 무기이온간 처리 비율에 따라 상이한 결과를 나타내 칼슘 부적절로 인한 막투과성의 변화를 논하기는 어려운 것으로 판단되었다. 그러나 Garman과 Mathis(1956)는 칼슘과 마그네슘, 가리의 비율의 중요성을 제시하였으나 이온 양이온 간의 생리적 관계는 아직 명백히 밝혀지지 않았으나 부적절한 양이온 비율에서는 광합성과 증산률 및 생육의 저하와 품질의 저하가 예상된다. 또한 반결구 상추에서는 칼슘이 부족했을 때 잎 끝마름이 발생하였으며, 두 품종 모두 배양액 조성이 부적합할 때는 생육량이 떨

어지는 경향을 보였다. 따라서 조절된 환경에서의 상추의 고품질 생산을 위한 적정 배양액 농도로 Ca, K, Mg, NH₄ 함량은 3.0~3.5me L⁻¹, 6.0~6.5me L⁻¹, 2.0~2.3me L⁻¹, 1.0me L⁻¹으로 각각 조절하는 것이 높은 생육과 잎끝마름 발생을 줄일 수 있을 것으로 판단되었다.

바) 배양액내 NO₃:NH₄ 비율이 반결구상추 생육과 무기양분 흡수특성에 미치는 영향

Table 4-46. Effect of NO₃:NH₄⁺ ratio on the growth of butterhead lettuce(*Lactuca sativa* var. *capitata*) at 38days after transplanting.

NO ₃ :NH ₄ ratio	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	CO ₂ assimilation (μmol/m ² /s)	RGR (g/g/day)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
						Top	Root	Top	Root
100 : 0	28a ²⁾	16.3a	15.2a	7.36	0.11	107.84a	25.63ab	4.25	1.17
92.5 : 7.5	27a	15.0b	15.3a	7.47	0.11	100.63a	26.25a	4.36	1.27
85 : 15	27a	15.2b	13.9b	7.63	0.09	94.38a	22.50bc	4.27	1.26
70 : 30	27a	16.1a	13.0c	7.98	0.08	80.00b	20.63c	4.68	1.38
50 : 50	24b	12.6c	11.0d	7.76	0.06	50.63c	15.63d	3.87	1.14

² Means separation within columns by duncan's multiple range test at 5% level.

Table 4-47. Nutrient content of lettuce leaves as influenced try NO₃:NH₄ ratio at 35days after trnasplanting.

NO ₃ :NH ₄ ratio	Leaf (%)				
	N	P	K	Ca	Mg
100 : 0	4.29	0.89	12.8	1.14	0.24
92.5 : 7.5	4.35	0.77	7.7	1.16	0.21
85 : 15	4.73	0.80	6.9	0.86	0.19
70 : 30	3.85	0.75	6.2	0.83	0.18
50 : 50	3.97	0.63	4.1	0.65	0.14

사) 칼슘농도와 NO₃:NH₄ 비율이 반결구상추 생육과 무기양분 흡수특성에 미치는 영향

Table 4-48. Effect of different NO₃⁻:NH₄⁺ ratio and Ca concentration on growth of butterhead lettuce(*Lactuce sativa* var. *capitata*) at 42 days after sowing.

NO ₃ :NH ₄ ratio	Ca concentration (ppm)	Root length (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
					Top	Root	Top	Root
100 : 0	10	19.9	13.2	8.0	21.69	4.78	1.45	0.28
	40	18.6	14.5	8.7	23.54	4.37	1.46	0.26
	120	16.6	14.9	8.6	28.36	4.53	1.68	0.30
50 : 50	10	13.7	11.8	7.5	18.12	3.14	1.43	0.30
	40	15.0	11.8	7.7	20.55	3.38	1.68	0.33
	120	16.0	11.8	7.8	21.09	3.53	1.55	0.30

Table 4-49. Effect of different NO₃⁻:NH₄⁺ ratio and Ca concentration on growth of butterhead lettuce(*Lactuce sativa* var. *capitata*) at 54 days after sowing.

NO ₃ :NH ₄ ratio	Ca concentration (ppm)	Root length (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)	
					Top	Root	Top	Root
100 : 0	10	37.4	17.9	11.4	121.75	19.20	5.53	0.98
	40	40.8	18.7	13.2	156.60	17.90	6.89	0.96
	120	42.2	18.1	12.4	133.57	25.15	6.77	1.32
50:50	10	23.6	18.7	11.8	87.21	22.37	4.61	1.27
	40	27.3	22.6	12.8	100.39	20.48	5.13	1.19
	120	23.3	18.7	12.3	96.74	24.53	5.51	1.48

Table 4-50. Nutrient content of lettuce leaves as influenced try different $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ ratio and Ca concentration at 28 days after sowing.

$\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ ratio	Ca concentration (ppm)	Leaf (%)					Root (%)				
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
100 : 0	10	5.48	0.52	8.52	0.58	0.39	5.05	1.24	8.47	0.41	0.25
	40	5.29	0.68	8.40	0.59	0.33	4.55	0.61	7.31	0.59	0.21
	120	5.51	0.72	8.05	0.65	0.28	4.55	1.68	7.27	0.72	0.20
50 : 50	10	4.57	0.56	4.44	0.33	0.26	4.09	2.03	3.27	0.24	0.09
	40	4.52	0.60	4.42	0.38	0.26	3.88	1.96	3.45	0.31	0.08
	120	4.81	0.38	6.72	0.54	0.24	4.14	2.17	5.14	0.49	0.08

Table 4-51. Nutrient content of lettuce leaves as influenced try different $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ ratio and Ca concentration at 42 days after sowing.

$\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$ ratio	Ca concentration (ppm)	Leaf (%)					Root (%)				
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
100 : 0	10	4.55	0.37	7.02	0.52	0.38	3.50	0.55	7.13	0.48	0.22
	40	5.48	0.48	9.53	0.59	0.35	4.84	1.52	6.93	0.52	0.24
	120	4.76	0.62	9.34	0.87	0.29	3.37	1.15	7.34	0.81	0.21
50:50	10	3.72	0.42	3.01	0.43	0.26	3.29	1.22	2.66	0.25	0.11
	40	4.01	0.45	3.52	0.59	0.23	3.37	0.11	2.91	0.34	0.11
	120	4.12	0.52	3.07	0.62	0.21	3.26	0.93	3.23	0.39	0.07

7) NO₃:NH₄ 비율과 CO₂시용에 따른 결구상추 무기양분 흡수특성, 생육에 미치는 영향

Table 4-52. Effects of NO₃-N:NH₄-N ratio and CO₂ concentration on CO₂ assimilation rates the mineral contents of crisphead lettuce leaves at 68days after sowing(Light intensity 667±70 μ mol/m²/s, Leaf temp. was 35.4°C).

Treatment		Stomatal	CO ₂	T-N	P	K	Ca	Mg
CO ₂	NO ₃ :NH ₄	resistance	assimilation	(%/dry wt.)				
(ppm)	(ratio)	(s/cm)	(μ mol/m ² /s)					
Control	100 : 0	0.535	10.80 c	3.73a ²⁾	2.17 a	8.78 a	0.77 ab	0.40 a
	75 : 25	0.782	8.29 cd	3.72 a	1.32 bc	4.18 c	0.50 c	0.25 c
	50 : 50	1.023	4.74 e	3.75 a	1.12 c	2.94 d	0.40 d	0.21 d
1500	100 : 0	0.309	18.99 a	3.93 a	2.31 a	9.06 a	0.82 a	0.40 a
	75 : 25	0.467	15.68 b	3.95 a	1.54 b	5.70 b	0.69 b	0.31 b
	50 : 50	0.497	6.99 d	3.82 a	1.08 c	2.89 d	0.34 d	0.20 d

²⁾Means seperation within columns by duncan's multiple range test at 5% level.

Table 4-53. Effects of NO₃-N:NH₄-N ratio and CO₂ concentration on growth and quality of crisphead lettuce at 68days after sowing.

Treatment		Top			Root			Nitrate (ppm)	Vitamin C (mg/100g)
CO ₂	NO ₃ :NH ₄	No. of leaves	Fresh wt. (g/plant)	Dry wt. (g/plant)	Length (cm)	Fresh wt. (g/plant)	Dry wt. (g/plant)		
Control	100 : 0	26.0b	267.6b ²⁾	11.67b	60.1a	27.9b	2.20a	5016a	7.3a
	75 : 25	25.7b	107.3c	6.57cd	29.9b	20.7c	2.11a	3489b	8.4b
	50 : 50	22.5c	54.0d	4.74d	19.5c	13.9d	2.01a	872c	9.6c
1500	100 : 0	29.7a	346.6a	15.06a	54.5a	37.9a	2.21a	4825a	5.7a
	75 : 25	26.3b	116.4c	7.41c	22.2c	25.2bc	2.09a	3157b	7.4b
	50 : 50	22.3c	64.9d	5.64d	21.2c	15.2d	1.97a	790c	8.6c

²⁾ : Means seperation within columns by duncan's multiple range test at 5% level.

3. 적 요

영양 생리 장애의 특성을 다각적인 방법으로 조사하여 영양진단 시스템 개발에 필요한 기초 자료를 얻기 위해서 잎상추, 반결구 상추, 결구상추를 중심으로 무기양분 결핍과 과잉 처리하에서 나타나는 각종 장애 증상을 영상화 하고, 생육특성을 조사하였다. 상추류의 식물체 분석 자료를 중심으로한 영양 진단 기준과 근권 무기양분별 적정 수준을 정리하였다.

재배 식물의 생육단계별 최적 영양상태를 유지함으로써 생산성과 품질을 향상시킬 수 있는 기초자료를 얻고자 미량원소 수준, 이온농도, 배양액 내 칼슘함량과 에틸렌 및 GR활성과의 관계, 기상환경, $\text{NO}_3:\text{NH}_4$ 비율과 이온간의 비율에 따른 무기양분 흡수특성, 생육등을 조사하였다.

제 2 절 재배식물의 영양진단 및 처방 시스템 개발

1. 재료 및 방법

가. 재배식물의 영양 및 생육진단 체계 구축

유묘의 관리를 위한 배양액은 서울시립대학교 환경원예학과 식물환경조절공학 실험실에서 개발한 잎상추 배양액(N 11.7, P 2.0, K 6.7, Ca 3.5, Mg 2.0 $\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$, Fe 2.0, Cu 0.1, B 0.5, Mn 0.3, Zn 0.3, Mo 0.05 ppm)을 사용하였으며(남, 1998). 이 때 pH 5.8, EC 1.6 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 조절하였다. 이후 6-7매의 본엽이 전개된 균일한 반결구 상추 “Omega”와 잎상추 “Grand rapids”묘를 재배 베드에 정식하였다.

실험에 사용한 배양액은 서울시립대학교 잎상추 배양액을 사용하였다. 무기 이온 제어 실험의 처리 내용을 살펴보면, 처리 1은 정식과 함께 배양액을 1회 공급하고 나머지는 초기 물량 수준으로 증류수를 계속 보충하였다(DW), 처리 2는 정식 때 배양액을 1회 공급한 이후 pH 5.8과 EC 1.6 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 3일에 1회씩 보정하다가 정식 후 15일부터는 2일에 1회 EC를 보정하였다(CM). 처리 3은 정식 때 배양액을 1회 공급하고 3일에 1회씩 pH를 5.8로 하여 배양액을 분석하여 초기 수준의 무기 이온 상태로 보정하였다(MN). 처리 4는 정식 때 배양액을 1회 공급하고 처리 3과 같이 배양액 분석을 통해 무기 이온을 보정하고 5일에 1회씩 식물체 엽분석을 통해 이온의 함량을 보정해주었다(ML). pH 조절은 H_2SO_4 와 NaOH를 사용하여 2일 1회씩 기준 pH 5.8로 보정하였다. 이온 보정을 해준 처리들은 오후 급액이 종료되는 시간에 시료를 채취하여 수질 분석을 하여 부족한 이온의 양을 계산한 이후 다음날 아침 급액 공급이 시작되기 전에 배양액을 보정해 주고, 정식 15일부터는 2일에 1회 보정하였다. 이온보정을 해 준 처리들은 $\text{NH}_4\text{-N}$ 공급에 의한 pH의 급저하 때문에 이온 보정을 해주는 처리들은 $\text{NH}_4\text{-N}$ 을 보정해 주지 않고 $\text{NO}_3\text{-N}$ 량에 포함시켜 총질소 개념으로 보정하였다.

식물체의 생체 계측은 광합성(Li-6200, Li-COR), 증산량(Li-1600, Li-COR), 엽

엽록소 함량(SPAD-502, Minolta), 영상분석(DC 260, Kodak)을 하였다. 생육 조사 항목은 엽수, 최대 엽장, 최대 엽폭, 지상부와 지하부 생체중, 건물중을 측정하였다. 식물체의 건조는 건조기에서 $60 \pm 5^\circ\text{C}$ 에서 3일간 건조한 다음 지상부를 마쇄한 다음 분석 시료로 하였다.

나. 생체 계측에 의한 생육, 영양진단 기술

환경변화에 따른 식물체 변화는 사람의 눈으로 인식되기까지는 상당한 시간이 소요되기 때문에 생체 계측기를 통해 식물체의 반응을 빨리 계측하는 기술이 필요하다. 식물생육에 적합하지 않은 환경조건은 생산량을 감소시키는데 직접적인 영향을 끼치기 때문에 이러한 식물체 생체계측 기술은 작물 생산에 있어 대단히 중요하다.

따라서 본연구는 광합성 측정기기(LI6200: Photosynthetic rate, Conductance, Stomatal resistance)와 증산량 측정기기(LI1600: Transpiration, Diffusive resistance), 엽록소 함량 측정기기(Minolta)를 통해 pH, EC, 광, 수분, 근권온도 stress에 따른 식물체의 반응을 control구와 비교해 살펴보았다. 공시작물 본엽 5~6매의 '은성백다다기' 오이와 반결구 상추 'Omega'를 재배하여, 측정은 처리후 3시간후부터 약 한시간 반 간격으로 해가지기 전까지 측정하였으며, 처리1일후, 2일후, 3일후까지 매일 1회씩 측정하였다. 근권온도 실험 처리 항목은 아래 표4-54와 같다.

Table 4-54. 생체계측 처리 항목

근권온도	증가: 30→48℃	감소:18→12℃
pH	증가: 6.5→8.5	감소: 5.5→3.5
EC	증가: 4.0→12.0	감소: 2.0-0.5
광	80%차광, 무차광	
수분	PEG: -2bar→-10bar NaCl: 4.6→12.0 dS · m ⁻¹	

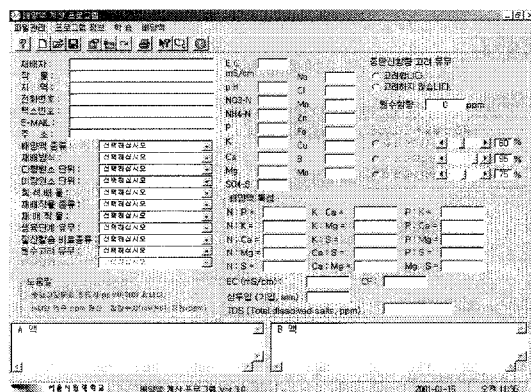
다. PC화상계측에 의한 재배 식물의 영양 및 생육 진단 시스템 개발

디지털 카메라로 촬영후 컴퓨터에 입력한 다음 8 bit color mode로 전환한 다음 212색 중 r 좌표값과 g 좌표값이 동시에 0이 아니고 b좌표는 0인 색상을 추출하였다. 그 다음 정상적인 상추잎에서 갖는 녹색계열의 색상값에서 RGB 좌표로 이동한 이후(홍, 1999), 색상간의 거리를 군집통계를 거쳐 표준화 한 다음 RGB값으로 변환하여 (0, 51, 0), (51, 51, 0), (51, 102, 0), (102, 102, 0), (0, 153, 0), (102, 153, 0), (153, 153, 0)로 7색을 선별하였다. 촬영한 이미지에서 선별된 색상과 같은 RGB 값을 가지는 픽셀수를 추출하여 분석하였다(류, 1994; Sen, 1999). 색상수 추출은 Visual Basic 5.0에서 이미지의 단위를 픽셀로 변환한 이후 RGB 함수에 픽셀단위로 대응시켜 배열체로 값을 반환하여 선별된 RGB 값과 동일한 픽셀값을 갖는 픽셀수를 기록하는 프로그램을 구현하여 분석하였다.

라. 식물공장에 적합한 과채류, 엽채류 양액재배시스템 및 배양액 종합관리 software 개발

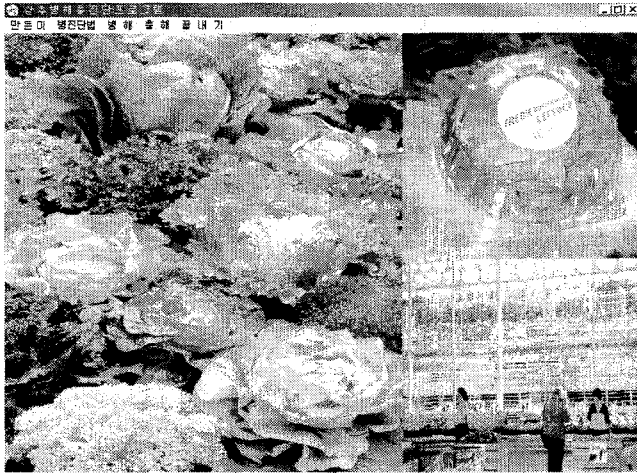
1)수경재배 배양액 계산 프로그램

본 프로그램은 Visual Basic으로 개발하였으며, 실행 환경은 Windows 95 이상의 운영체제에 실행되며, 800×600 환경에서 최적화되었다.



<수경배배 배양액 계산 프로그램 초기화면>

2) 영양진단 및 병해충 관리 프로그램 개발

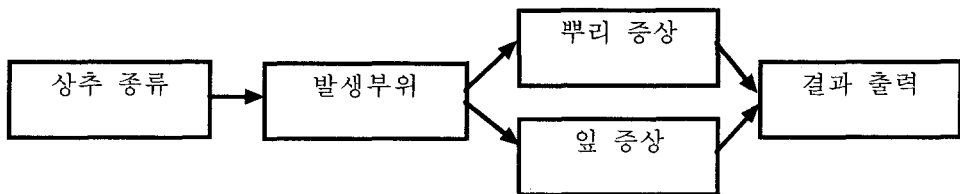


<상추류 영양진단 및 병해충 관리 프로그램 초기화면>

가) 실행 환경 및 특징

본 프로그램은 Visual Basic으로 개발하였으며, 실행 환경은 Windows 95 이상의 운영체제에게 실행되며, 800×600 환경에서 최적화되었다.

상추류 영양진단 프로그램의 순서도는 다음과 같다.



2. 결과 및 고찰

가. 재배식물의 영양 및 생육진단 체계 구축

1) 배양액내 무기 이온 제어

배양액내 pH, EC, 무기이온 함량을 조사한 결과 pH의 변화를 보면 증류수만 보충해준 처리가 반결구상추와 잎상추 모두에서 pH가 4.0대로 급저하후 S자형을 그리면서 8.0으로 상승하였다. 반면에 EC 처리는 나머지 이온 보정을 해준 두 처리들보다 점진적으로 먼저 pH가 상승하는 변화를 보였다(Fig. 4-12).

무기 이온 제어에 따른 근권내 EC 변화를 보면, 증류수 보충 처리는 14일만에 반결구상추와 잎상추 모두 EC 1.0 dS·m⁻¹수준으로 진입하여 20일 지난 이후에는 EC 0.6 dS·m⁻¹ 미만으로 유지되면서 더 이상 균형적으로 배양액 흡수가 이루어지지 않음을 시사하였다. (Fig.4-13)

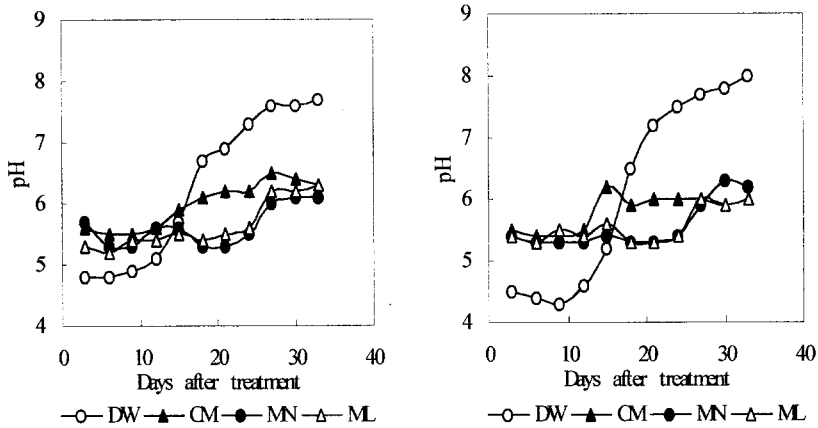


Fig. 4-12. Changes in pH of butterhead lettuce 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) after control of nutrient minerals.

DW : Fill up a tank with distilled water.

CM : Custom management for nutrient solution.

MN : Control of pH and mineral nutrients in management for nutrient solution.

ML : Control of pH and mineral nutrients and leaf analysis in management for nutrient solution.

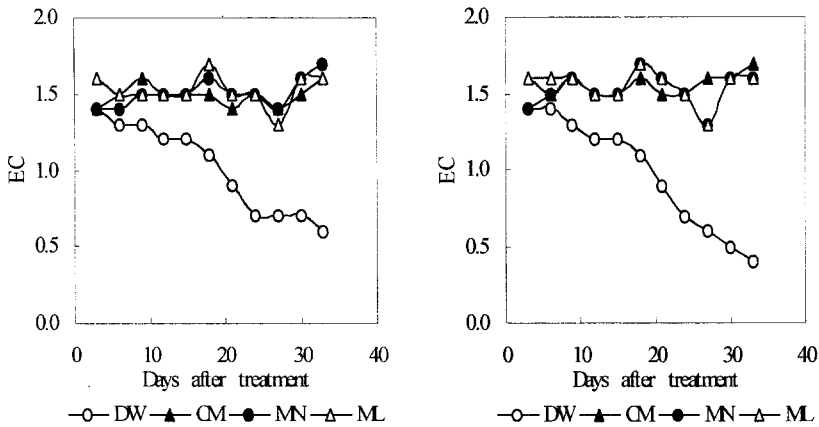


Fig. 4-13. Changes in EC butterhead 'Omega' (left) and lettuce 'Grand Rapids' (right) after control of nutrient minerals.

DW : Fill up a tank with distilled water.

CM : Custom management for nutrient solution.

MN : Control of pH and mineral nutrients in management for nutrient solution.

ML : Control of pH and mineral nutrients and leaf analysis in management for nutrient solution.

배양액내 이온중 K의 경우에는 분열조직의 활동이 활발한 생육 초기에 많이 흡수하여 모든 처리와 품종에서 기준 $6.7 \text{ me}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 약 55% 수준으로 감소하였다. 생육 중반에 들어서는 EC 처리는 기준의 50% 수준에서 나타났고, 이온 보정 처리는 이보다 높은 80% 수준을 보였으며, 이온보정과 엽분석 후 보정 처리는 완만하게 상승하여 기준 수준으로 유지되었다(Fig. 4-14).

Ca과 Mg의 변화를 살펴보면 두 품종 모두 처리간 변화 추이가 유사하게 진행되었다. 증류수 보충 처리는 지속적인 감소로 매우 낮은 수준으로 유지되었지만 잎 끝마름증은 나타나지 않았는데, 이는 다른 무기이온들까지 낮은 수준에 의한 생육 부진과 EC 저하에 따른 배양액내 삼투압 감소가 원활한 수분공급이 이루어졌기 때문으로 해석된다. EC 처리는 기준 $3.5 \text{ me}\cdot\text{L}^{-1}$ 보다 최고 2배에 이르는 농도를 나타내 배양액내 집적되는 것으로 나타났다. 하지만 이온 보정 처리들은 기준농도 수준에서 유지됨으로써 Ca의 집적 현상이 나타나지 않았다. Mg의 경우에도 증류

수 보충 처리는 꾸준히 감소한 반면 EC 처리는 기준 농도에 최고 2배에 접근하는 집적 현상을 보였다. 하지만 이온 보정 처리들은 집적되지 않는 것을 보였다. .

양이온간의 상관관계를 보면 증류수만 보충한 처리는 두 품종 모두 양이온이 모두 동시에 감소하는 결과를 보였으며, EC 처리는 두 품종 모두 K이 적어지며, Ca과 Mg이 집적되는 관계를 보였다. 반면 이온 처리를 해준 처리들은 두 품종 모두 정부 상관관계를 보이지 않았고, 반결구상추에서는 이온 보정과 엽분석 후 보정 처리에서 잎상추는 이온 보정 처리가 근권내 이온간 일정한 농도를 유지될 수 있는 원 표면 형태에 가장 가까운 형태로 나타났다(Fig. 4-15, 4-16).

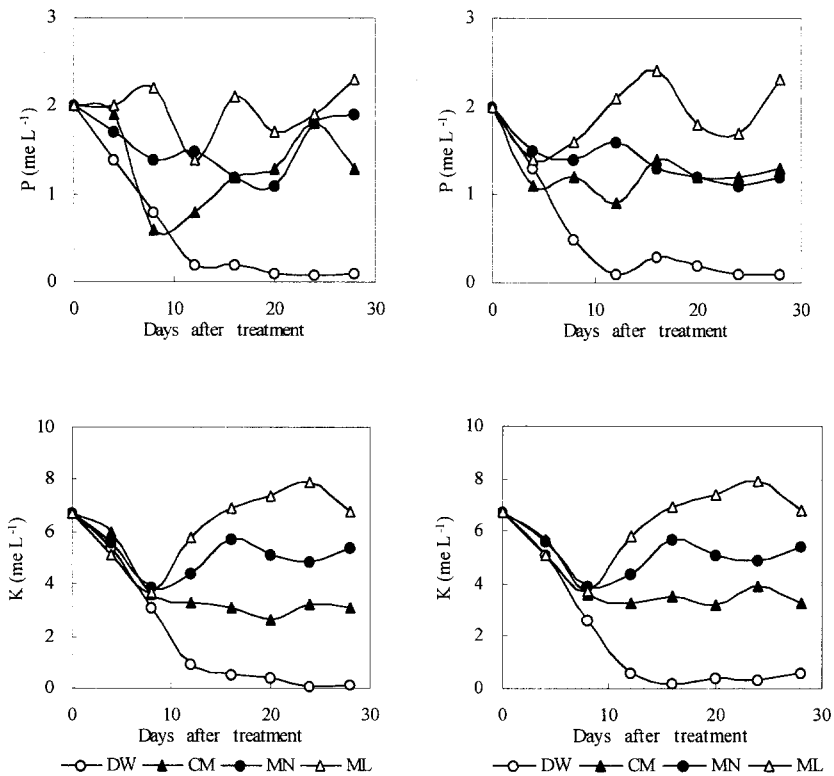


Fig. 4-14. Changes in P and K concentration of butterhead lettuce 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) after control of nutrient minerals.

DW : Fill up a tank with distilled water.

CM : Custom management for nutrient solution.

MN : Control of pH and mineral nutrients in management for nutrient solution.

ML : Control of pH and mineral nutrients and leaf analysis in management for nutrient solution

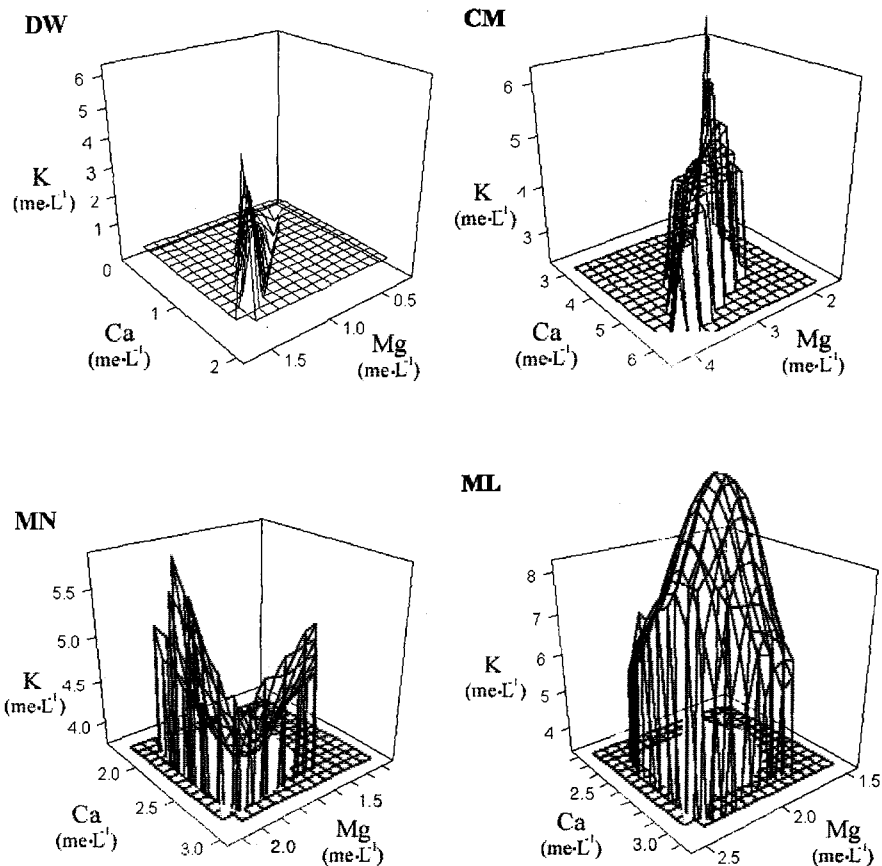


Fig. 4-15. Relationship between cation concentrations in the nutrient solution after treatment of butterhead lettuce 'Omega'.

DW : Fill up a tank with distilled water.

CM : Custom management for nutrient solution.

MN : Control of pH and mineral nutrients in management for nutrient solution.

ML : Control of pH and mineral nutrients and leaf analysis in management for nutrient solution

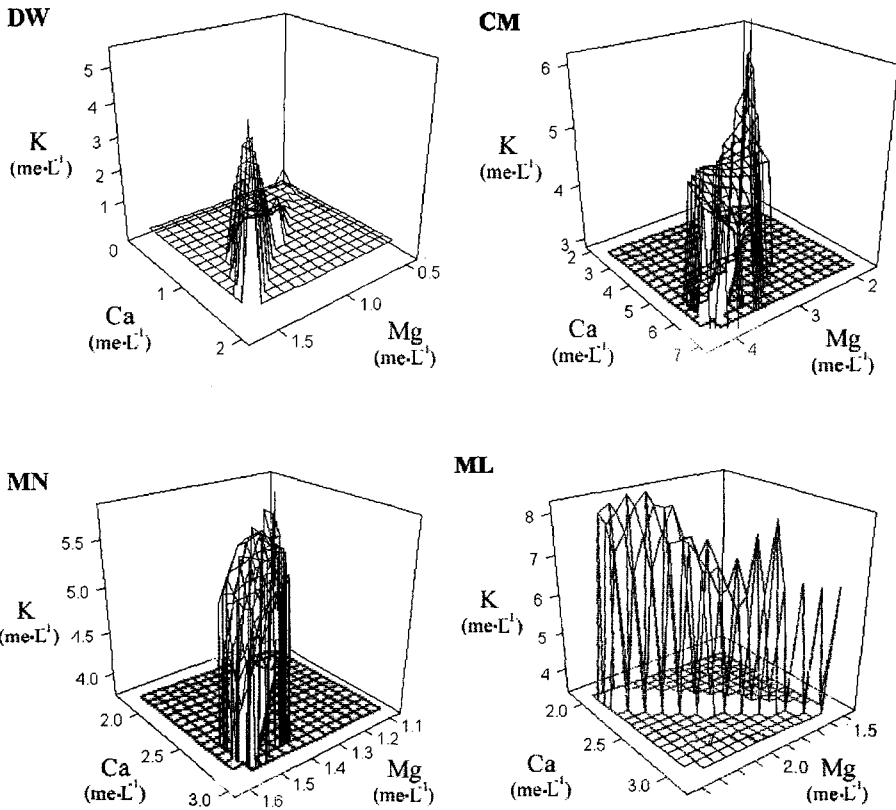


Fig. 4-16. Relationship between cation concentrations in the nutrient solution after treatment of leaf lettuce 'Grand Rapids'.

DW : Fill up a tank with distilled water.

CM : Custom management for nutrient solution.

MN : Control of pH and mineral nutrients in management for nutrient solution.

ML : Control of pH and mineral nutrients and leaf analysis in management for nutrient solution

상추의 배양액내 이온 제어가 반결구상추와 잎상추의 생육에 미친 영향을 보기 위해 엽수, 엽장, 엽폭, 생체중, 건물중을 조사하였다. 처리 10 일에는 공시작물 모두 증류수만 보충한 처리가 다른 처리보다 생체중이 증가하였지만 건물중에서는 차이가 없는 것으로 나타났다.

처리 20 일에는 증류수만 보충한 처리가 반결구상추와 잎상추 모두 생육 전반

에 걸쳐 생육이 급격히 저하되었다. 잎상추의 경우에는 경엽이 급속히 연약해지고 엽색이 옅어져 육안 식별이 가능했다.

반결구상추에서는 EC 처리, 잎상추에서는 이온 보정을 해준 처리들이 다른 처리들보다 높아지기 시작했다.

처리 30 일에는 증류수만 보충해준 처리에서 엽색이 심하게 옅어지고, 잎상추의 경우에는 경엽이 심하게 연약해져서 도복현상이 나타나 식물체 지탱조차 어려웠다. 이온보정을 해준 처리들이 두 품종 모두에서 EC 보정 처리보다 높게 나타났다. 특히 반결구상추에서는 이온 보정과 엽분석 후 보정 처리의 생체중이 높게 나타났으며, 잎상추에서는 이온보정 처리와 이온보정과 엽분석 후 보정 처리간의 차이가 없었다.

가. 생체 계측에 의한 생육, 진단 기술

1) 엽채류 생체 계측에 의한 생육 진단 기술

식물공장에서 재배되는 식물을 중심으로 비파괴적인 생체계측기술을 축적하여 간이하게 생육 및 영양상태의 이상을 파악하여 정상적인 생육으로 유도함으로써 식물공장 생산성과 품질을 극대화하는데 필요한 기초자료를 얻기 위해서 그 동안의 연구결과에서 얻어진 최적 수준의 환경조건에서 각 환경요인의 변화를 유도하여 생체계측을 한 결과는 다음과 같다.

지상부 환경요인중 광량을 줄였을 때 (80%차광) 상추류 생체반응을 본 결과 광합성은 바로 급격히 감소한 후 2일 이후부터 순화되는 것으로 나타났으나 기공확산저항은 3hr 이후 증가하여 1일 후 부터는 점차 정상으로 환원되는 경향을 나타냈다. 반면에 증산량은 차광과 함께 바로 감소하였으며, 확산저항도 바로 증가한 후 광순화에 따른 반응이 적게 나타나고 있었다. 광Stress에 대한 생체반응을 신속하게 측정하여 확인할 수 있는 방법은 광합성계측이 가장 빠른 것으로 나타났으며, 그 외에도 증산량과 확산저항 계측으로도 가능한 것으로 보였다. 간이 엽록

소 측정계에 의한 엽록소 함량 측정결과는 차이가 없는 것으로 나타났다.

근권환경 변화에 따른 생체정보 변화를 측정하였다. 수경재배에서 수시로 변화여 작물생육에 가장 큰 영향을 미치는 배양액 pH stress반응을 본 결과 pH증가에 따른 광합성은 오메가가 처리 6시간 이후부터 급격히 감소하는 경향을 보였다. 반면에 기공저항은 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 한편, 증산량은 처리 6~7.5시간 이후부터 감소하기 시작하였으며, 확산저항은 3시간 이후부터 pH가 낮아짐에 따라 급격히 증가를 나타냈다.

단기간 동안의 pH변화에 따른 엽록소 함량 변화는 없었다. 이상의 결과를 미루어 보아 근권의 pH stress 영향을 신속히 확인할 수 있는 것은 Porometer를 이용한 확산저항 계측이라고 볼 수 있었다. 특히 근권 pH저하의 영향이 작물에 미치는 영향이 pH가 높아지는 경우보다 큰 것으로 나타났다.

근권 배양액 농도변화에 따른 Omega와 Grand rapid의 생체반응을 보면 전기전도도가 높아지는 경우에서 전기전도도가 낮아지는 경우보다 생체반응이 빠르고 큰 것으로 보였다. 근권의 전기전도도(EC)가 적정수준 이상 혹은 이하로 변함에 따른 광합성은 처리 3시간부터 급속히 낮아졌으며, 특히 EC 증가에 대한 반응이 높게 나타났다. 기공확산저항도 4.5hr이후부터 증가하기 시작하였으며, 증산량과 확산저항은 EC증가에 따른 반응이 신속히 나타났으며, 그 반응값의 정도가 생체 계측 수단으로 Porometer를 이용한 확산저항 계측법이 우수한 것으로 나타났다. 근권내 수분 스트레스에 대한 반응을 NaCl과 PEG로 조절하여 계측환경과 광합성 기공확산저항, 증산량 및 확산저항 값의 변화가 모두 신속히 나타났다. 이들 계측 요인 중 확산저항의 반응이 가장 신속하고도 큰 값으로 나타나 수분 변화에 대한 저가의 생체 계측 수단으로 이용가능 하였다. 근권온도 변화에 대한 상추의 생체 반응은 4.5~6시간 이후부터 광합성 저하로 나타났으며, 기공확산저항은 종에 따른 차이를 나타냈다. 그러나 근권온도 증가에 따른 증산량과 확산저항의 변화가 처리 6시간 이후부터 급격히 나타났다. 이처럼 근권온도 변화에 따른 생체반응계측으로 확산저항 계측이 좋은 수단이 될 수 있다는 것을 보여 주었다.

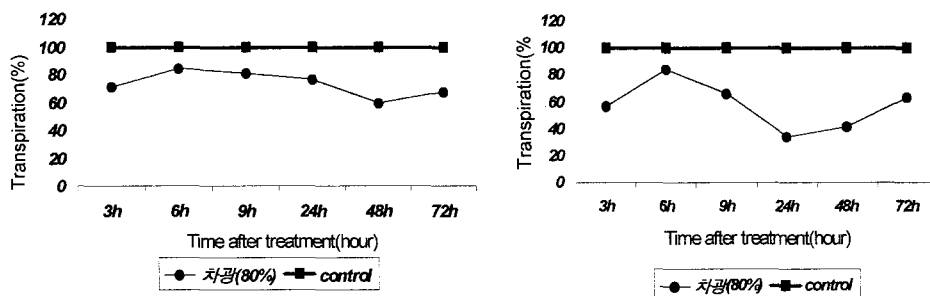


Fig. 4-20 Effect of light stress on Transpiration of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)'.

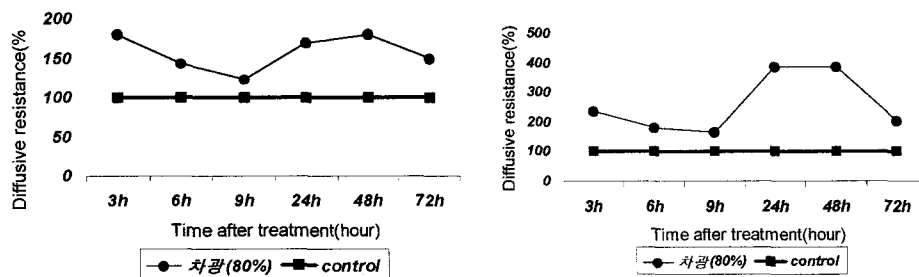


Fig. 4-21 Effect of light stress on Diffusive resistance of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)'.

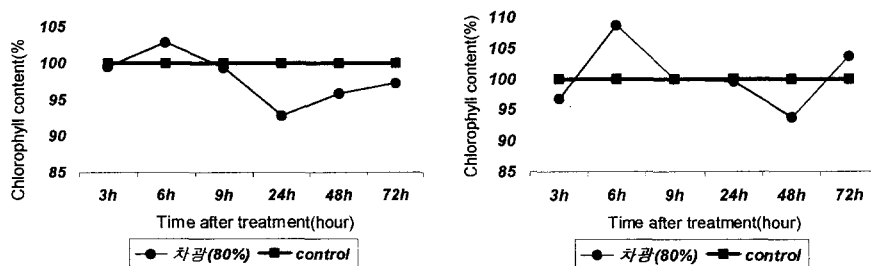


Fig. 4-22 Effect of light stress on Chlorophyll content of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)'.

나) 근권 환경에 따른 생체 반응

① 배양액 pH stress(Omega, Grand rapid)에 따른 생체 반응

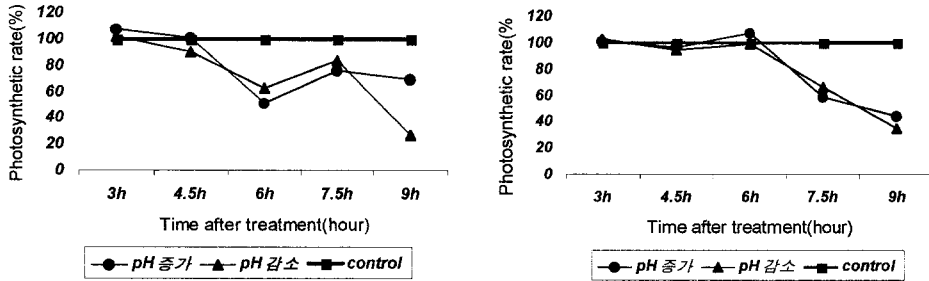


Fig. 4-23 Effect of pH stress on Photosynthetic rate of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)

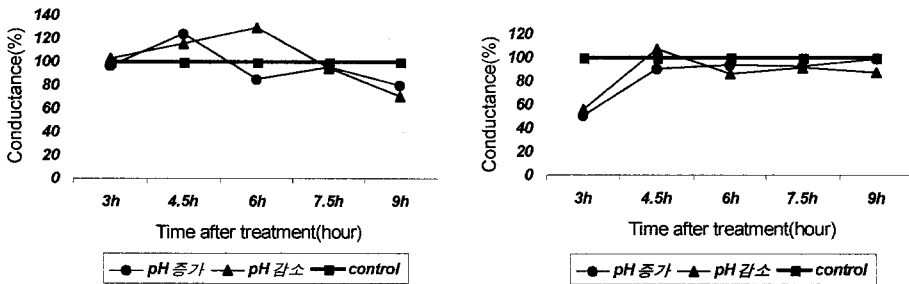


Fig. 4-24 Effect of pH stress on Conductance of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)

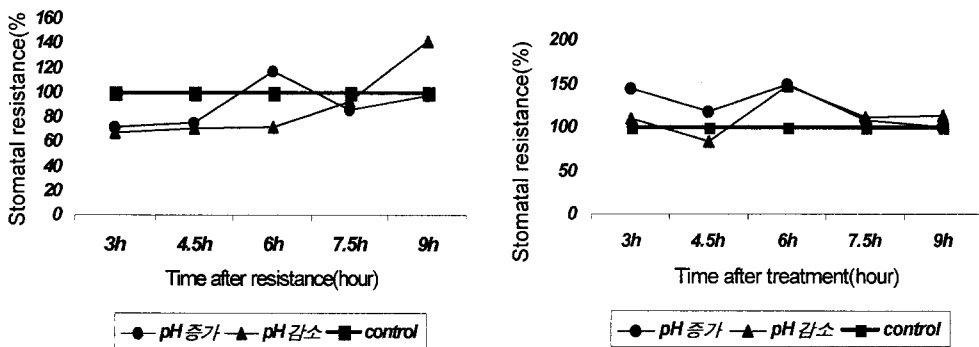


Fig. 4-25 Effect of pH stress on Stomatal resistance of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)

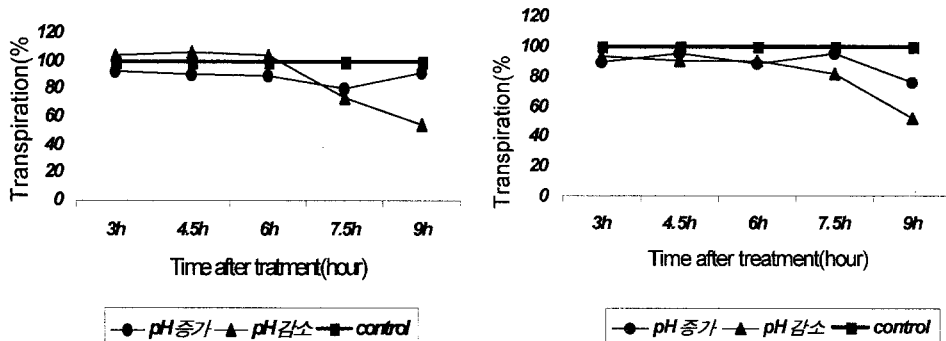


Fig. 4-26 Effect of pH stress on Transpiration of *Lactuca sativa* 'Omega' and 'Grand rapid'

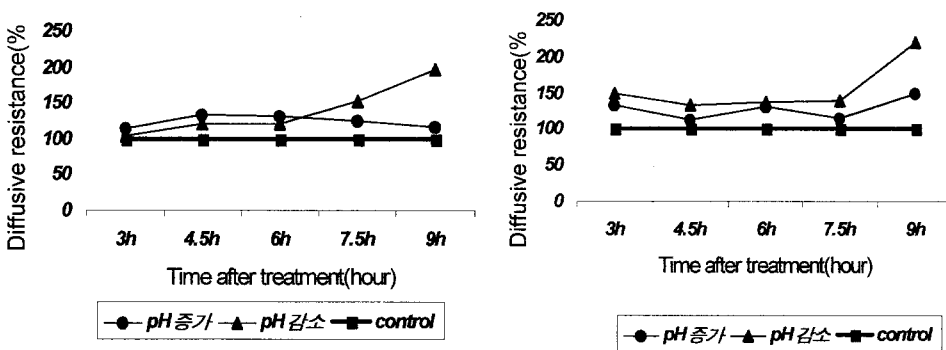


Fig. 4-27 Effect of pH stress on Diffusive resistance of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)

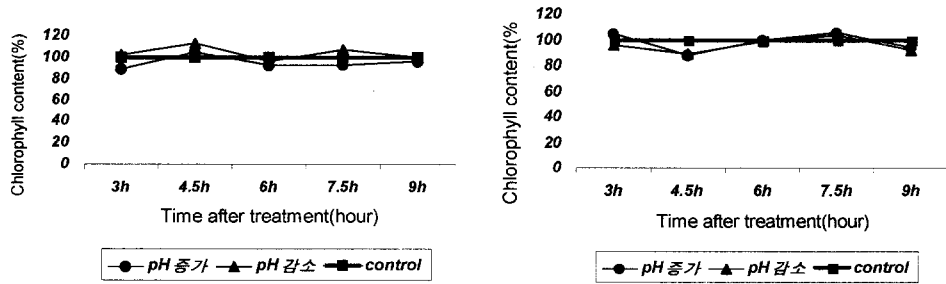


Fig. 4-28 Effect of pH stress on Chlorophyll content of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)

② EC stress(Omega, grand rapid)

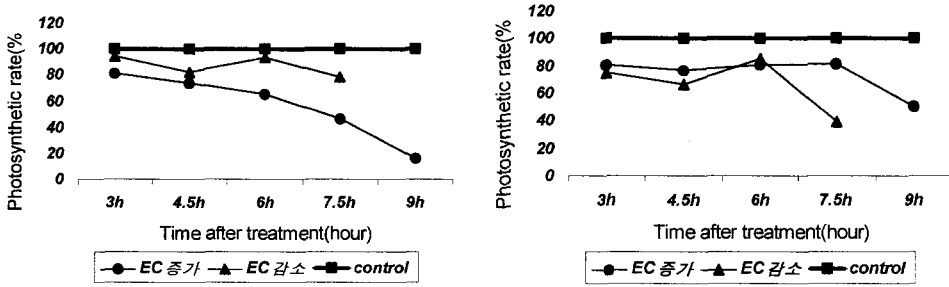


Fig 4-29 Effect of EC stress on Photosynthetic rate of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)

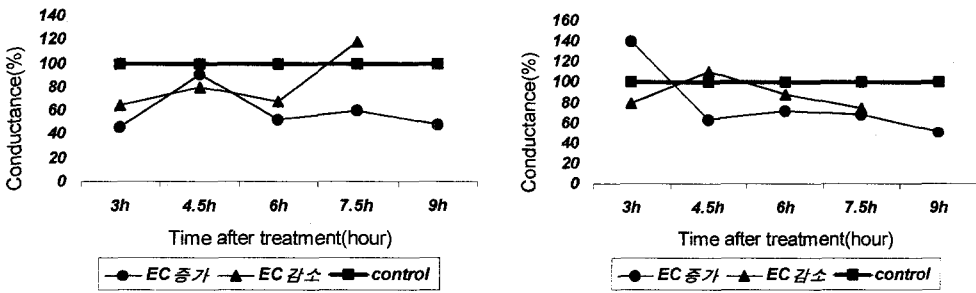


Fig. 4-30 Effect of EC stress on Conductance of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right).

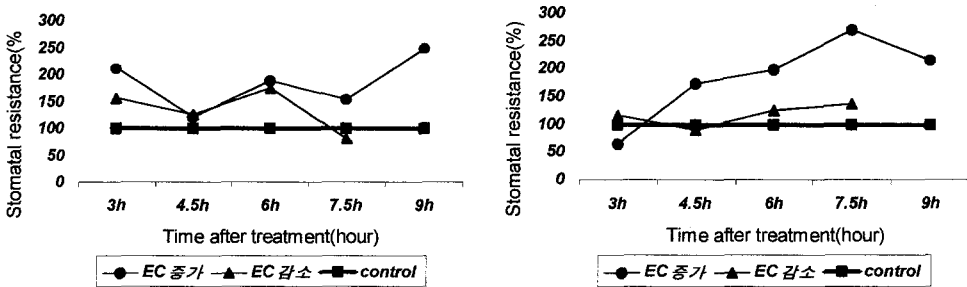


Fig. 4-31 Effect of EC stress on Stomatal resistance of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right).

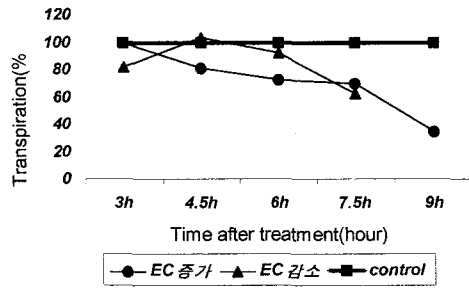
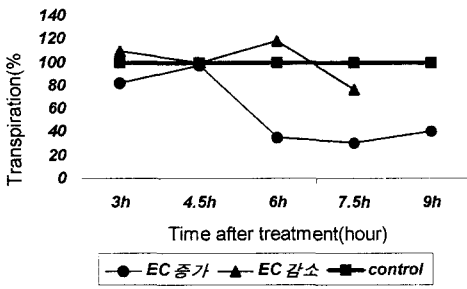


Fig. 4-32 Effect of EC stress on Transpiration of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right).

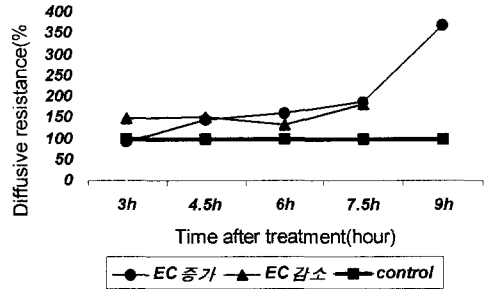
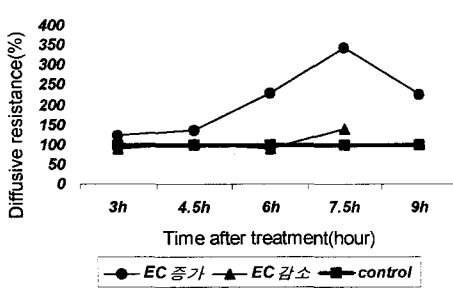


Fig. 4-33 Effect of EC stress on Diffusive resistance of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)'.

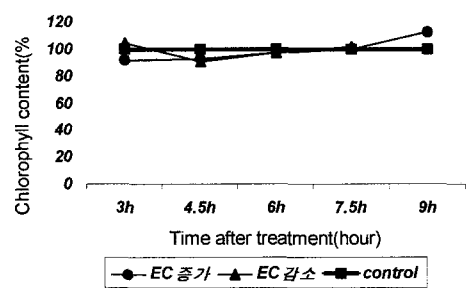
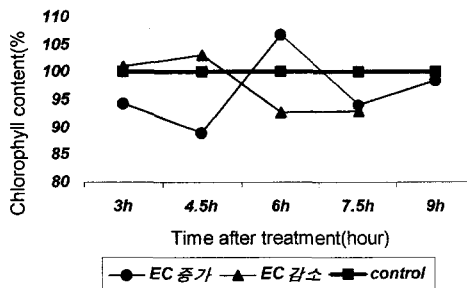


Fig. 4-34 Effect of EC stress on Chlorophyll content of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)'.

③ water stress(Omega, Grand rapid)

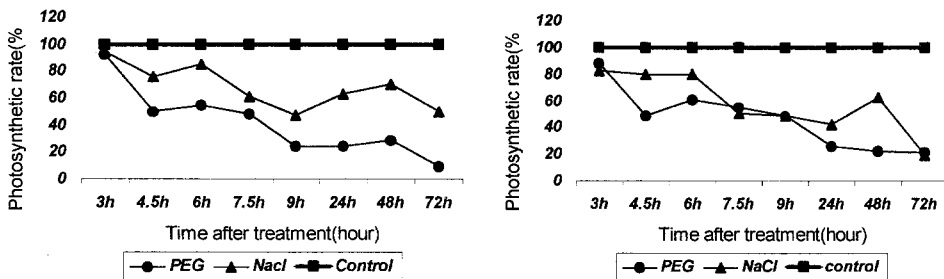


Fig. 4-35 Effect of water stress on Photosynthetic rate of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right).

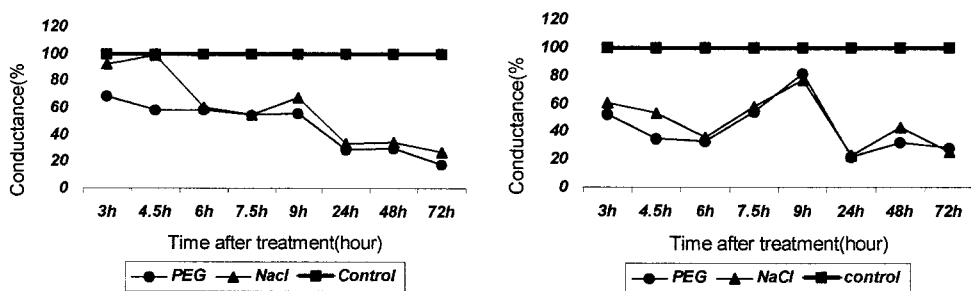


Fig. 4-36 Effect of water stress on Conductance of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right).

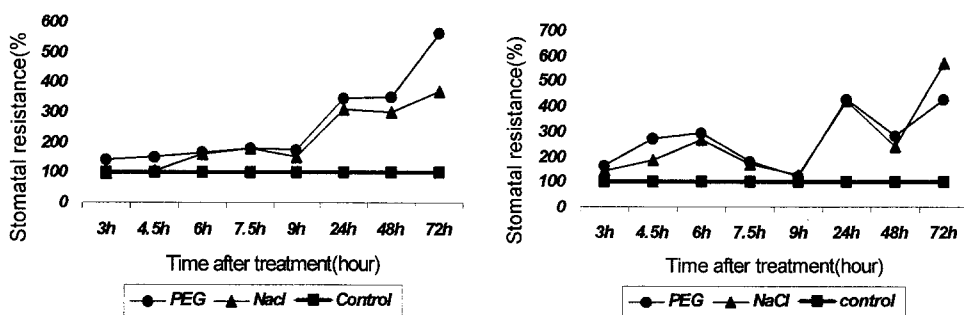


Fig. 4-37 Effect of water stress on Stomatal resistance of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right).

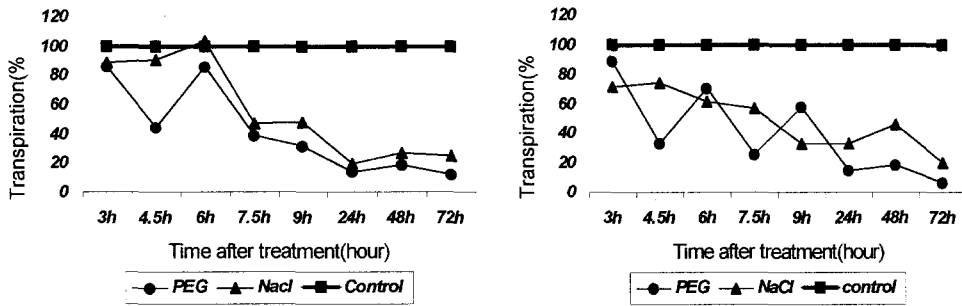


Fig. 4-38 Effect of water stress on Transpiration of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)'.

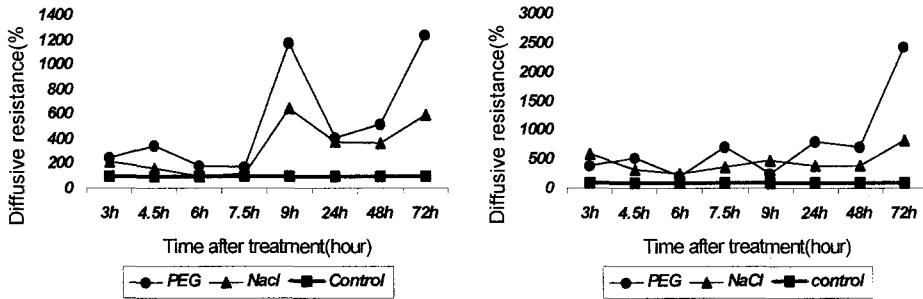


Fig. 4-39 Effect of water stress on Diffusive resistance of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)'.

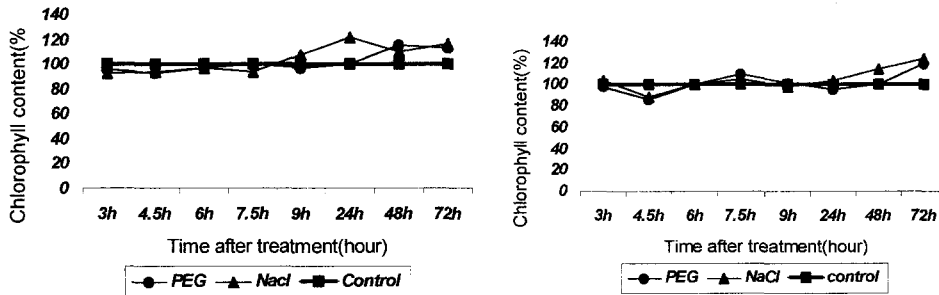


Fig. 4-40 Effect of water stress on Chlorophyll content of *Lactuca sativa* 'Omega'(left) and 'Grand rapid'(right)'.

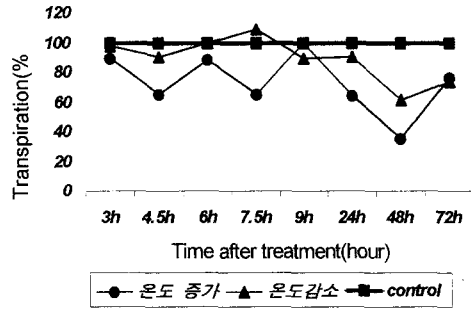
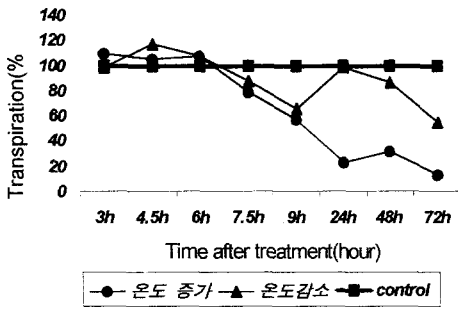


Fig. 4-44 Effect of root temperature stress on Transpiration of *Lactuca sativa* 'Omega(left) and 'Grand rapid'(right)'.

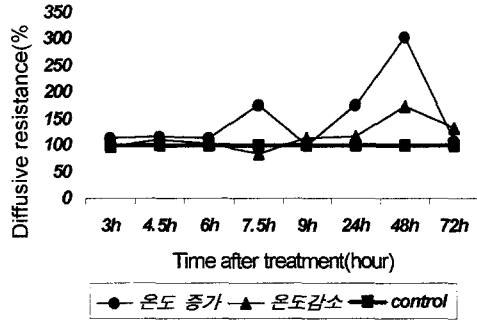
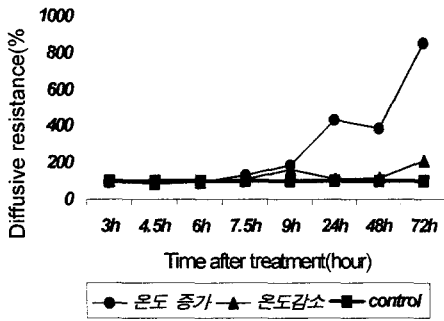


Fig. 4-45 Effect of root temperature stress on Diffusive resistance of *Lactuca sativa* 'Omega(left) and 'Grand rapid'(right)'.

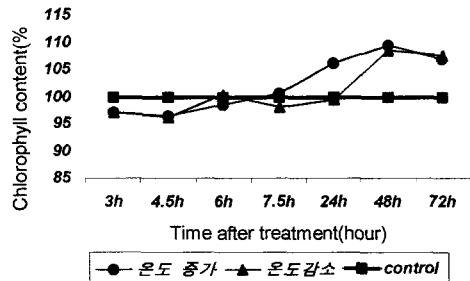
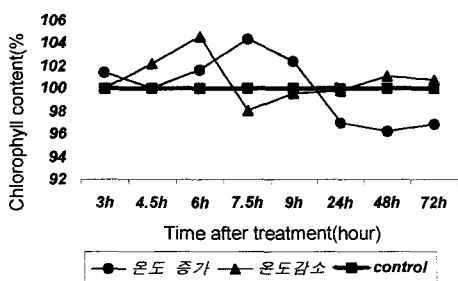


Fig. 4-46 Effect of root temperature stress on Chlorophyll content of *Lactuca sativa* 'Omega(left) and 'Grand rapid'(right)'.

다. PC화상계측에 의한 재배 식물의 영양 및 생육 진단 시스템 개발

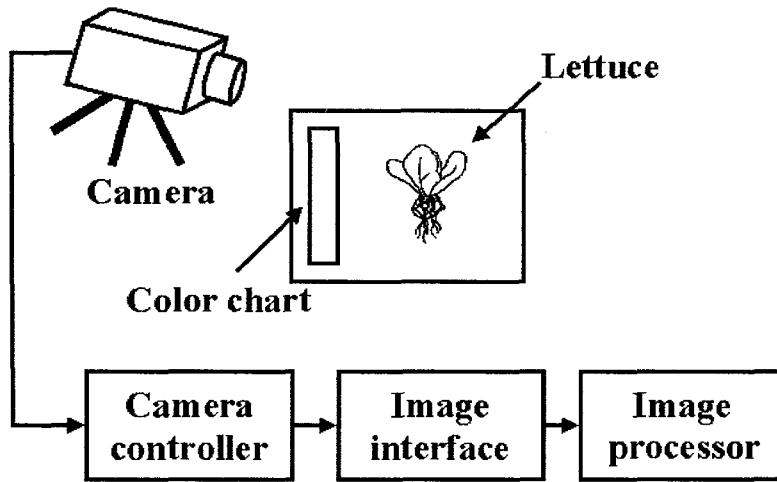


Fig. 4-47. A scheme of the photographing system. Description in materials and methods.

1) 상추의 엽색변화

엽색을 나타내는 녹색의 정도는 이온보정과 엽분석 후 보정처리가 더 높게 나타났다. 잎상추는 이온보정 처리에서 광합성과 엽록소 함량이 높은 것으로 나타났으며, 녹색 정도는 이온보정과 엽분석 후 이온보정처리에서 이온보정 처리보다 유의성있게 높았다(Fig. 4-48).

엽색은 엽록소 함량과 광합성 작용, 엽내 질소량을 간접적으로 알아볼 수 있는 척도이며, 상추의 지상부 생육과 품질을 판정할 수 있다. 생육 중기 이후에는 종류 수 보충 처리가 나머지 처리들과는 육안으로 식별이 가능할 정도로 엽색이 차이를 나타냈다. 질소 함량, 엽록소 함량에서 차이가 엽색으로 뚜렷한 차이가 생긴 것으로 생각된다.

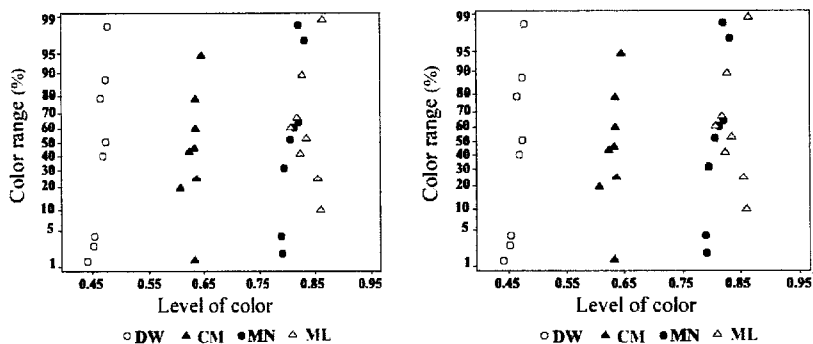


Fig. 4-48. Relationship between level of color and color range of butterhead lettuce 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand Rapids' (right) .

DW : Fill up a tank with distilled water.

CM : Custom management for nutrient solution.

MN : Control of pH and mineral nutrients in management for nutrient solution.

ML : Control of pH and mineral nutrients and leaf analysis in management for nutrient solution.

라. 식물공장에 적합한 과채류, 엽채류 배양액 종합관리 software 개발

1) 수경재배 배양액 계산 프로그램 개발

가) 실행 환경 및 특징

본 프로그램은 Visual Basic으로 개발하였으며, 실행 환경은 Windows 95 이상의 운영체제에게 실행되며, 800×600 환경에서 최적화되었다.

본 프로그램에서 배양액 종류는 여러나라의 유명처방(한국, 일본, 네덜란드와 벨기에)을 수집 정리하여 내장하였으며, 재배방법을 순환식과 비순환식으로 구분하였다. 다량원소 단위와 미량원소 단위는 사용자가 손쉽게 이용할 수 있도록 선택할 수 있다. 다량원소인 경우 한국과 일본에서 주로 사용되는 단위인 me와 ppm, 유럽에서 주로 사용되는 단위인 mM으로 구분하였으며, 미량원소인 경우 한국과 일본에서 주로 사용되는 단위인 ppm, 유럽에서 주로 사용되는 단위인

μM 으로 구분하였다. 희석배율은 50배~250배까지 사용자 임위에 맞게 설정할 수 있으며, 재배작물은 과채류, 엽채류, 화훼류 및 기타 작물로 구분하여, 개발된 배양액에 맞춰 설정되어 있다. 그리고 작물 생육단계에 따른 배양액 조성을 내장하였으며, 비료염중 질산칼슘은 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 와 $5[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]\text{NH}_4\text{NO}_3$ 두가지중 하나를 선택할 수 있게 하였다. 원수를 분석할 경우엔 각 원소의 함량을 고려할 수 있게 하였으며, 원수단위도 다량원소는 mM 과 ppm , 미량원소는 μM 과 ppm 로 구분하였다. 그리고 원수 속의 중탄산함량을 고려할 것인지에 대해서도 옵션 사항을 두었다. 원수 속의 중탄산함량 고려시 중탄산함량을 조절할 수 있는 산 종류는 3가지로 선택할 수 있게 하였으며, 산의 순도도 설정가능하도록 하여, 정확한 산 첨가량을 계산하도록 하였다. 그리고 배양액 계산중 자동계산과 사용자 계산이 가능하도록 하였다.

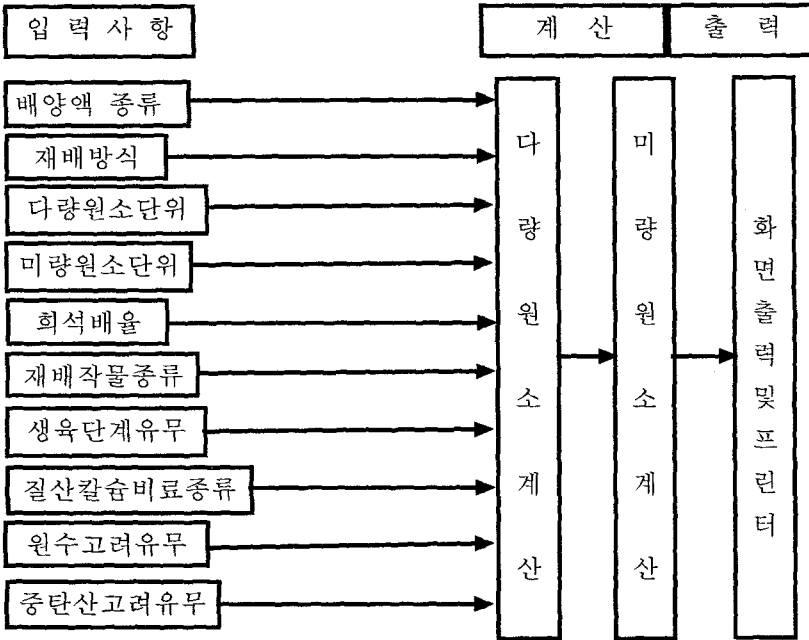
미량원소 비료염중 철은 Fe-EDTA, Fe-DTPA, Fe-EDDHA로 계산할 수 있고, 붕소는 붕산과 붕사로 계산할 수 있다. 그리고 망간은 무수염, 1수염, 5수염으로 계산할 수 있고, 몰리브덴은 몰리브덴산암모늄과 몰리브덴산나트륨으로 계산할 수 있다. 따라서, 사용자가 이러한 비료염중 한가지를 선택하여 사용할 수 있는 장점이 있다.

결과 출력 화면은 계산 결과가 텍스트 박스에 출력되며, 배양액 조성 및 배양액에 대한 특성에 관한 내용이 화면과 프린터에 출력되도록 하였다. 프린터 출력은 2장으로 출력되는데, 첫 번째 장은 사용자가 선택한 사항 및 특성이 출력되며, 두 번째 장은 배양액 조성표가 A 배양액, B 배양액, C 배양액 그리고 주의사항이 출력된다. 출력된 결과에 대해 파일로 저장이 가능하여 연구소나 학교 등에 자료를 보내 도움을 받을 수 있도록 하였다. 프로그램에 대해 사용자가 쉽게 이해할 수 있도록 하기 위해 사용방법에 대한 도움말 항목을 추가하였으며, 수경재배에 대한 용어를 설명할 수 있는 용어해설란도 만들었다.

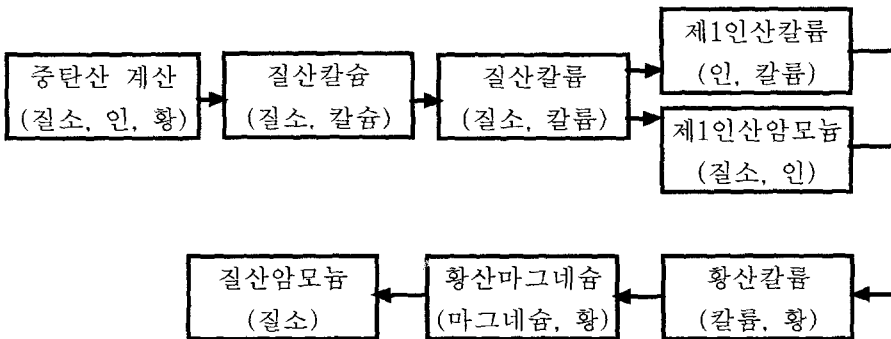
또한 본 프로그램을 보완하여 인터넷 상에서 접속하여 실시간으로 처방 및 계산이 가능한 시스템에 대해 개선중이다.

나) 계산 흐름도

프로그램을 수행하기 위한 개략적인 흐름도는 다음과 같다.



다량원소 비료염은 2가지 원소가 함께 존재함으로써, 2가지 원소를 고려해야 할 필요가 있다. 그렇기 때문에 다량원소 계산할 때에는 비료염 순서에 의해 계산하는 것이 가장 간단한 방법이다. 다량원소 계산할 때 계산 순서 흐름도는 다음과 같다.



미량원소 비료염은 각 원소별로 비료염이 존재하기 때문에, 각 이온별 비료염으로 계산될 수 있다.

다) 결과 출력

원소명	단위	계산 결과
Ca	g	90.80
P	g	14.19
K	g	14.19
Mg	g	0.75
S	g	1.72
Na	g	3.99
Cl	g	4.75
Fe	g	2.00
Zn	g	2.45

원소명	단위	계산 결과
B	g	0.00
Cu	g	0.00
Fe	g	0.00
Mn	g	0.00
Ni	g	0.00
Mo	g	0.00
P	g	0.00
S	g	0.00
Zn	g	0.00
V	g	0.00

<다량원소 계산 결과>

<미량원소 계산 결과>

원소명	단위	계산 결과
Ca	g	90.80
P	g	14.19
K	g	14.19
Mg	g	0.75
S	g	1.72
Na	g	3.99
Cl	g	4.75
Fe	g	2.00
Zn	g	2.45

<출력 결과>

다량원소와 미량원소가 자동 및 수동으로 계산할 수 있도록 되어 있어 교육적인 면에서 좋으며, 사용자 임의대로 계산이 가능하다. 그리고 배양액 계산에 관련된 선택한 사항에 대한 결과가 화면에 출력된다. 저장 및 인쇄할 경우에는 저장 및 항목 버튼을 누르면 화면에 출력된 내용이 텍스트 박스에 출력된다. 재계산 항목을 클릭하면 모든 항목이 초기화되어 다시 배양액 계산이 가능하다.

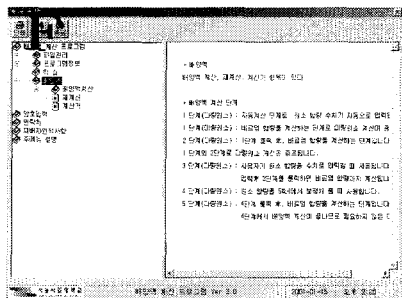
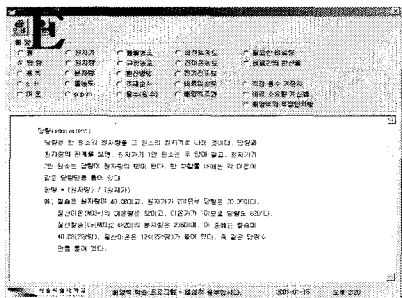
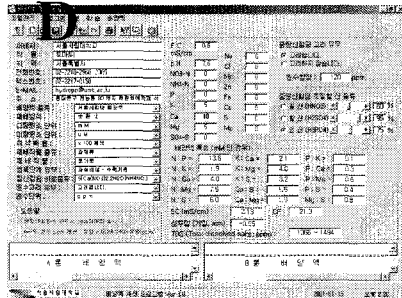
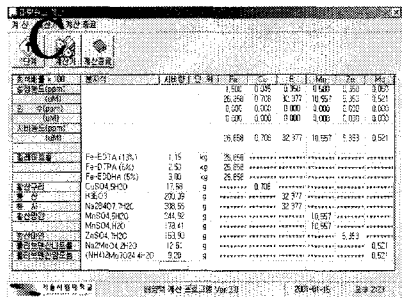
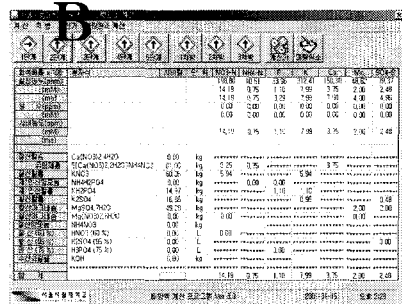
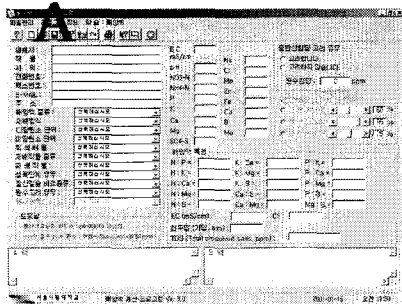
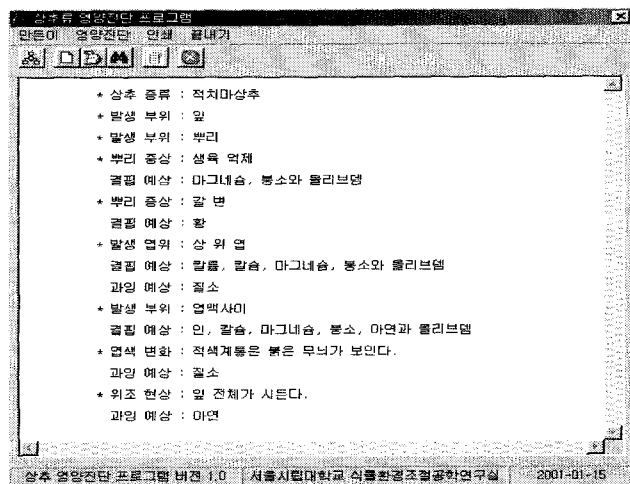
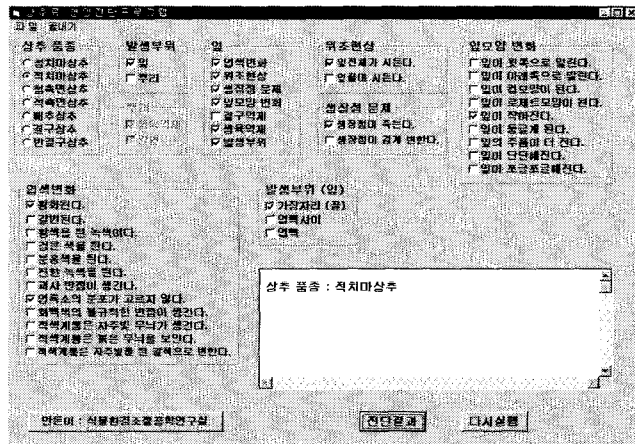


Fig. 4-49. An example of an interface screen used the part of Nutrient Solution Calculation software.

- A : Main document screen
- B : Macronutrient calculation screen
- C : Micronutrient calculation screen
- D : Result screen
- E : Study screen
- F : Help screen

2) 식물공장내 상추류의 영양 및 생육 진단 프로그램 개발

그동안의 연구 결과를 모아 식물공장 및 수경재배 상추류를 대상으로 하여 영양 진단, 병충해 관리 및 생육진단 프로그램 “식물공장 상추류 영양진단 및 처방”을 만들었다. 상추류의 각종 생리장애와 영양진단에 필요한 기존자료와 칼라사진을 포함한 이들 자료는 식물공장 뿐만아니라 일반 수경재배 농가에서 상추류 재배에 필요한 모든 자료를 제공할 수 있도록 하였다.



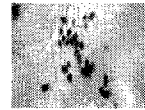
<상추류 영양진단 프로그램 출력결과>

1. 진딧물류

(1) 분류 : 진딧물과 (aphid)

(2) 특징

- 바이러스매개(복숭아혹진딧물, 찌리수염진딧물)
- 기주범위가 넓다(복숭아혹진딧물)
- 다범성(찌리수염진딧물, 감자수염진딧물)



복숭아혹진딧물

(3) 피해

- 잎뒷면에서 무리지어 흡즙한다(복숭아혹진딧물, 찌리수염진딧물, 감자수염진딧물)
- 식물체의 잎이 위축되어 생육이 정지(복숭아혹진딧물)



찌리수염진딧물

(4) 형태

- 복숭아혹진딧물, 찌리수염진딧물, 감자수염진딧물
- 몸길이 1.3-1.5mm(복숭아혹진딧물)
- 몸길이 2.2-3mm(찌리수염진딧물)

(5) 생애

- 상추에서는 초여름에 발생(찌리수염진딧물)
- 알로 월동하여 3월하순~4월상순에 월동(복숭아혹진딧물)
- 성숙기간 약 11일, 생식기간 16일, 수명 29일(복숭아혹진딧물)



감자수염진딧물

(6) 방제

- 시설내 유입을 막음
- 약제방제(레테노유제, 프톤관유제, 모노프록제, 아시트스회계 등을 잎뒷면에 살포)
- 동업계통의 약제를 피하여 다른 약제와 번갈아 살포한다.

<상추류 병해충 프로그램 출력결과>

상추류 영양진단 프로그램의 출력은 텍스트 박스에 출력되며, 파일로 저장 및 프린터로 출력이 가능하다. 여러 가지 증상에 대한 결과가 출력되므로, 그림 항목으로 가서 증상에 적합한 그림을 하나씩 찾는 것이 좋다. 복합적인 증상에 대한 내용이 없으므로 원소간의 상호작용에 대한 내용이 수록되어 있으므로, 이를 참고하는 것이 좋다.

상추 영양진단

1. 상추 영양진단 기준

대상작물 : 상추(배추) / 토 : 근형 토양 / pH :

영양소	단위	가	나	다	라	마	바
질소(N)	g/kg	1.00	0.90~0.70	0.80~1.2	0.8~1.2	0.24~0.71	0.20~0.42
인(P)	g/kg	0.50~0.5	0.5~0.8	0~1.0	0.8~1.0	0.2~0.5	0.2~0.5
칼륨(K)	g/kg	4~5	4~5	4~5	4~5	4~11	4~11
칼슘(Ca)	g/kg	11	11	11	11	11	11
마그네슘(Mg)	g/kg	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
붕소(B)	g/kg	10~20	10~20	10~20	10~20	10~20	10~20

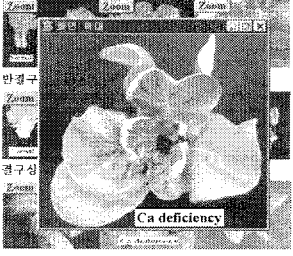
비양분소 (단위 : mg)

영양소	단위	가	나	다	라	마	바
질소(N)	g/kg	1.00~2.04	0.9~1.10	0.7~1.30	0.8~1.2	0.2~0.5	0.20~0.50
인(P)	g/kg	0.50~1.00	0.5~0.8	0.8~1.0	0.8~1.0	0.2~0.5	0.2~0.5
칼륨(K)	g/kg	4~5	4~5	4~5	4~5	4~11	4~11
칼슘(Ca)	g/kg	11	11	11	11	11	11
마그네슘(Mg)	g/kg	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
붕소(B)	g/kg	10~20	10~20	10~20	10~20	10~20	10~20

인상주 : Leaf lettuce

1. 칼슘

- (1) 흡수형태 Ca^{2+}
- (2) 생리적 역할
 - ① 세포의 신장과 분열에 필요
 - ② 세포의 항해지기와 막의 투과성을 줄임
 - ③ 핵산의 방아 및 생합, 근육의 생합촉인
 - ④ 잎의 노화를 지연하고 낙엽이 되는 것을 억제
 - ⑤ 유기산과 결합
 - ⑥ 양분의 이동과 관계
 - ⑦ 칼슘고정촉진
- (3) 결핍증상
 - ① 생장지체
 - ② 인트사이년 함유물들은 자주색으로 변색
 - ③ 결구물리가 인색으로 구부러지면서 수직상으로 보임
 - ④ 수량이 적절하여 상품성을 저하
- (4) 병징내역
 - ① 열매내역
 - ② 수분포급하고 칼슘, 칼륨이 시용을 줄인다
 - ③ 건조경도도 높고 적정 수분으로 낮춘다
- (5) 식물체와 근권내 적정 칼슘 수준
 - ① 식물체내 적정 칼슘 함량 0.8~1.8%
 - ② 식물체내에서 결핍할 수 있는 함량 0.6% 이하
 - ③ 근권내 적정 칼슘 농도 100~300ppm

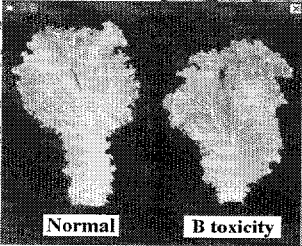


만경구
결구상
Ca deficiency

인상주 : Leaf lettuce

1. 붕소

- (1) 흡수형태 BO_3^{3-}
- (2) 생리적 역할
 - ① 세포의 분열과 조직의
 - ② 세포벽의 미세구조
 - ③ 핵산합성과 식물호르몬에
 - ④ 탄수화물 대사 - 당분산
- (3) 결핍증상
 - ① 만경구상추는 토제브라
 - ② 가간지리와 열매간의 동색으로 얼룩짐
 - ③ 인트사이년 함유물들은 자주색으로 변색
 - ④ 결구물리가 갈라짐
 - ⑤ 뿌리는 매우 빈약하게 지낸다
- (4) 결핍내역
 - ① 열매내역, 근권내 함유량
 - ② 해당액의 pH를 알칼리성(적당수분 유지 pH 5.5-6)
- (5) 과잉증상
 - ① 노엽에서 발생
 - ② 갈색빛 화색의 말라버린
- (6) 과잉내역
 - ① 해당액을 희석하여 붕소함량을 낮춘다
 - ② 해당액의 pH를 산성화되지 않도록 한다
- (7) 식물체와 근권내 적정 붕소 수준
 - ① 식물체내 적정 붕소 함량 30~60 ppm
 - ② 식물체내에서 붕소결핍과 과잉이 나타날 함량
 - 결핍 : 20 ppm 이하
 - 과잉 : 80 ppm 이상
 - ③ 근권내 적정 붕소 농도 0.2~1.0 ppm

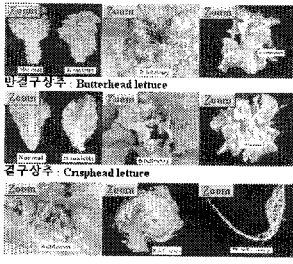


Normal
B toxicity

인상주 : Leaf lettuce

1. 붕소

- (1) 흡수형태 BO_3^{3-}
- (2) 생리적 역할
 - ① 세포의 분열과 조직의 분화
 - ② 세포벽의 미세구조
 - ③ 핵산합성과 식물호르몬에 관여
 - ④ 탄수화물 대사 - 당분산과 아미노
- (3) 결핍증상
 - ① 만경구상추는 토제브라와 비슷한 모양
 - ② 가간지리와 열매간의 동색으로 얼룩짐
 - ③ 인트사이년 함유물들은 자주색으로 변색
 - ④ 결구물리가 갈라짐
 - ⑤ 뿌리는 매우 빈약하게 지낸다
- (4) 결핍내역
 - ① 열매내역, 근권내 함유량을 과도 사용하지 않것
 - ② 해당액의 pH를 알칼리성이 되지 않도록 하고 적당수분 유지(pH 5.5-6.2)
- (5) 과잉증상
 - ① 노엽에서 발생
 - ② 갈색빛 화색의 말라버린 반점이 황실모양으로 변해나간다
- (6) 과잉내역
 - ① 해당액을 희석하여 붕소함량을 낮춘다
 - ② 해당액의 pH를 산성화되지 않도록 한다
- (7) 식물체와 근권내 적정 붕소 수준
 - ① 식물체내 적정 붕소 함량 30~60 ppm
 - ② 식물체내에서 붕소결핍과 과잉이 나타날 함량
 - 결핍 : 20 ppm 이하
 - 과잉 : 80 ppm 이상
 - ③ 근권내 적정 붕소 농도 0.2~1.0 ppm



만경구상추 Butterhead lettuce
결구상추 Crisphead lettuce

3. 적 요

광합성 측정기기(LI6200: Photosynthetic rate, Conductance, Stomatal resistance)와 증산량 측정기기(LI1600: Transpiration, Diffusive resistance), 엽록소 함량 측정기기(Minolta)를 통해 pH, EC, 광, 수분, 근권온도 stress에 따른 생체 반응을 조사하여 생체 계측하였다.

그동안의 연구 결과를 모아 식물공장에서 가장 먼저 실용적으로 재배가 가능한 상추류를 중심으로 영양진단, 병충해 관리 및 생육진단 프로그램을 개발하였다. 화상계측에 의한 재배 식물의 영양 및 생육 진단을 위해 상추잎의 색상수를 이미지의 단위 픽셀로 변환한 이후 RGB 함수에 픽셀단위로 대응시켜 배열체로 값을 반환하여 선발된 RGB 값과 동일한 픽셀값을 갖는 픽셀수를 기록하는 프로그램을 구현하여 상추의 엽색변화를 분석하였다. 또한 수경재배 배양액 계산 프로그램을 개발하였다. 프로그램에서 배양액 종류는 여러나라의 유명치방(한국, 일본, 네덜란드와 벨기에)을 수집 정리하여 내장하였으며, 재배방법을 순환식과 비순환식으로 구분하였다. 배양액 조성 단위, 농도, 비료 선택등을 사용자가 손쉽게 이용할 수 있도록 하였다.

제 3 절 비파괴적인 영양진단 체계개발

1. 재료 및 방법

가. 비파괴적인 영양진단 기술

1) SCDSV를 이용한 영양진단

작물의 영양상태는 엽내 영양상태를 측정하거나, 엽내 엽록소 함량을 측정함으로써 간이하게 파악할 수 있다. 지금까지는 영양상태를 파악하기 위하여 복잡하고 고가의 장비를 이용한 엽분석을 하여야만 가능하였다. 최근에는 엽색표(color chart) 및 적색과 근적외선의 파장에서 엽의 흡광도차에서 엽록소 함량을 측정할 수 있는 휴대용 엽록소 측정장치가 개발되어 있다. 이러한 간이한 측정기를 이용하면 작물영양상태를 파악할 수 있어 배양액 관리에 적극 활용 할 수 있다.

반사광 스펙트럼 측정에서 측정할 수 있는 질소량은 620nm와 760nm의 반사계수에 의해서 추정가능하고 엽록소 함량은 560nm와 850nm의 반사계수에 의해서 추정된다. 그러나 작물의 종류, 품종, 생육시기 및 무기이온에 따라 반사계수의 차이가 있으므로 목적에 따라 반응곡선을 따로 만들어야 한다. 과채류와 과수에서는 충분한 연구가 이루어 졌으나, 엽채류에서는 아직 시작 단계로서 주요 무기원소를 중심으로 비파괴적인 영양진단 가능성과 생체계측 정보를 얻기 위해서 실험을 수행 하였다.

1999년 5월 10일 본엽 5매 내외의 상추를 담액수경으로 하여 정식후 7일간 SCU 조성으로 재배한 후 조정된 양액을 처리하였다. 조정용 양액은 다량원소 N는 0, 10, 50 100, 150, 200, 300mg l^{-1} , P은 0, 10, 20, 40, 80, 160 mg l^{-1} , K은 0, 10, 50, 150, 250mg l^{-1} , Ca은 0, 10, 40, 80, 120, 160mg l^{-1} , 그리고, Mg은 0, 10, 20, 40, 80, 160mg l^{-1} 으로, 미량원소 Fe은 0, 0.5, 1, 3, 6, 12mg l^{-1} , B는 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 10mg l^{-1} 로 조절하였다.

처리후 25일째, 간이엽록소함량(minolta) 측정과 생육조사를 하였다.

2) 비파괴적인 질소 영양진단

공시 작물은 잎상추(*Lactuca sativa* L. 'Grand Rapids')로 과종은 1998년 3월 29일에, 정식은 5월 1일에 실시하였다. 수경 재배방법으로는 박막수경법(NFT)을 택하였으며, 배양액은 서울시립대학교 잎상추 배양액(N 11.7, P 2.0, K 6.7, Ca 3.5, Mg 2.0 meL^{-1})을 기준으로 질소 농도를 0, 10, 50, 100, 150, 300 mgL^{-1} 수준으로 조절하였다. pH는 5.8 ~ 6.2 범위를 유지하였다. SCDS(Specific color difference sensor)값의 측정은 생육단계에 따라 3차례 측정하였으며, 이때 광합성, 증산량, 엽록소함량 및 생육조사를 수행하였다. 특히 SCDS값을 측정된 잎을 채취하여 농진청 식물체 분석법에 준하여 엽내 질소함량을 분석하였다.

3) 비파괴적인 칼슘 영양진단 -방사선 동위원소에 의한 칼슘 흡수 양상

반결구 상추를 인공광 병용형 벤토온실에서 재배하여 결구가 형성되었을 때(엽수 25~30매) 1998년 10월 9일 플라스틱 포트에 옮겨 심어 서울시립대 상추 배양액(pH 5.7~6.0, EC 1.5 dS m^{-1})으로 1주일 순화시켰다.

시간과 EC에 따른 ^{45}Ca 흡수능은 반결구 상추를 정단부로부터 엽수 12~15매를 남겨두고 하위엽은 모두 제거하였으며, 엽위에 따른 ^{45}Ca 흡수능은 엽수 30매인 반결구 상추를 사용하였다. 배양액내 EC 처리는 1.5 dS m^{-1} , 4.5 dS m^{-1} , 9.0 dS m^{-1} , 13.5 dS m^{-1} 의 4처리한 후 환경조절상(20°C, 150~200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPF)에서 각 처리별로 24시간 순화시켰다. 각 처리에 따른 반결구 상추 ^{45}Ca 흡수능을 확인하기 위해 모든 배양액에 포트당 ^{45}Ca 를 370kBq 가했다. 시간별 처리는 1.5 dS m^{-1} 의 배양액에서 3시간, 6시간, 12시간, 18시간, 24시간 처리하였으며, EC별 처리는 각 처리 수준에서, 엽위별 처리는 1.5 dS m^{-1} 의 배양액에 ^{45}Ca 를 각각 24시간 처리한 후 흡수능을 측정하였다.

^{45}Ca 흡수능 측정은 관주 후 즉시 지제부를 잘라내어 여지(50cm×50cm)위에 잎을 잘 펴서 놓은 후 다시 여지를 덮고 두꺼운 판자로 누른 후 90°C의 정온기에서 10분간 두어 ^{45}Ca 이동을 중지시켰다. 이를 다시 꺼내어 미리 80°C로 조절된 건조기에 넣어 12시간 건조시킨 후 건조된 조직을 고밀도필름(랩)으로 싸서 재생가능한 전자 감광필름(Fujifilm, BAS-MP 2040S, 20×40cm)이 들어 있는

cassette(IP-CST 2040G)에 넣고 12시간 방치하여 방사선에 노출시킨 후 식물체를 제거하였다. 그리고 ^{45}Ca 로부터 방출된 방사선에 의하여 필름건판이 감광된 정도를 image analyzer(BAS 1500)로 분석한 후 photo stimulated luminescence (PSL)로 바뀌어 나타난 영상을 컴퓨터로 측정하였다. PSL을 컴퓨터로 다시 해상하여 감광정도를 색도차로 표시하고 현상기(Fujix Pictography 3000)로 인화하였다. PSL를 측정하고 난 조직을 분쇄하여 잘 혼합한 후 100mg을 취하여 도가니에 넣고 500°C에서 12시간 태워 완전 탄화시켰다. 이를 냉각시킨 후 실온에서 1N-HCl로 용해시키고 80°C 건조기에서 건조시켰다. 여기에 증류수 2ml를 첨가하여 다시 녹여낸 용액과 LSC 전용 cocktail 용액(Ready Organic, Beckman)이 1:4가 되게 희석하였다. 이 용액을 방사능 측정용 10ml vial에 담아서 liquid scintillation counter(LSC 6500, Beckman)를 이용하여 ^{45}Ca 의 방사능을 측정하였다.

나. 배양액 관리 기술에 따른 생체 반응 및 영양진단

1) 엽채류

반결구 상추 'Omega'와 잎상추 'Grand rapids' 품종을 배양액은 서울시립대 잎상추 배양액을 사용하였다. 처리 1은 배양액을 정식 할 때 1회만 공급하고, 그 후에는 초기 물량 수준으로 증류수만 계속 보충하였다. 처리 2는 배양액을 pH 5.8과 EC 1.6 dS · m⁻¹로 3일마다 보정하였다. 처리 3은 배양액을 분석하여 초기 공급한 무기이온의 수준으로 보정하였다. 처리 4는 배양액과 식물체를 분석하여 보정하였다. 생육조사, 광합성측정, 증산량 측정 및 배양액 분석을 하였다.

2) 과채류

은성백다다기(홍농종묘) 오이 품종을 4월 13일 페트리디쉬에 최아시켜 싹이 난 뒤 4월 17일 암면포트에 이식하고 5월 13일 정식하였다. 배양액은 SCUC액 (영양생장기 : N 11.4, P 3.3, K 6.0, Ca 4.5, and Mg 3.0 me · l⁻¹, 생식생장기 : N 10.4, P 3.3, K 5.0, Ca 4.5, and Mg 2.5 me · l⁻¹)을 사용하였다. 재배시스템은 순환식 시스템으로 40(W)×120(L)×15(H)cm 베드에서 20 cm ×20 cm 간격으로 4주의

식물을 2줄로 심었다. 급액은 적산일사량 센서에 의해 20 cal/cm^2 가 적산될 때 마다 급액이 되도록 하였다. 배양액은 EC 조절(EC), N,P,K 조절(NPK), N,P,K,Ca,Mg 조절(Macro), 다량원소와 미량원소 조절(Macro & Micro)의 4가지 처리로 각각 조절하였다. 배양액의 pH는 5.8 ± 0.2 로 유지하였다. 처리는 5월 27부터 처리를 시작하여 3일 간격으로 조절하였는데 EC조절은 $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 로 유지하고, 나머지 처리구 배양액을 정밀분석하여 모자라는 각각의 이온함량을 비료로 보충해 주어 조절하였다. 생육조사, 광합성측정, 증산량 측정 및 배양액 분석을 하였다.

2. 결과 및 고찰

가. 비파괴적인 영양진단기술

1) SCDSV를 이용한 영양진단

다양한 근권 무기양분 공급에 따른 광합성, 증산, 확산저항의 변화를 보았다. 광합성과 증산은 적정 농도까지 증가하고, 과잉농도에서는 감소하는 경향을 나타내었다.

간이 엽록소 측정장치를 이용한 상추의 비파괴적인 영양진단 가능성을 검토하기 위해서 질소를 비롯한 다량원소와 미량원소를 농도별로 실험하여 검토한 결과 엽록소함량은 질소와 철농도 증가에 따라 증가되는 경향을 보였으며 상추의 SCDSV값과 엽내 질소 및 철함량간에 정의상관을 보였다.

13가지 필수 원소에 대한 비파괴적인 영양진단 가능성을 간이 엽록소 측정기 (Minolta 520)를 이용하여 검토한 결과 N과 Fe에서 그 가능성이 보였다.

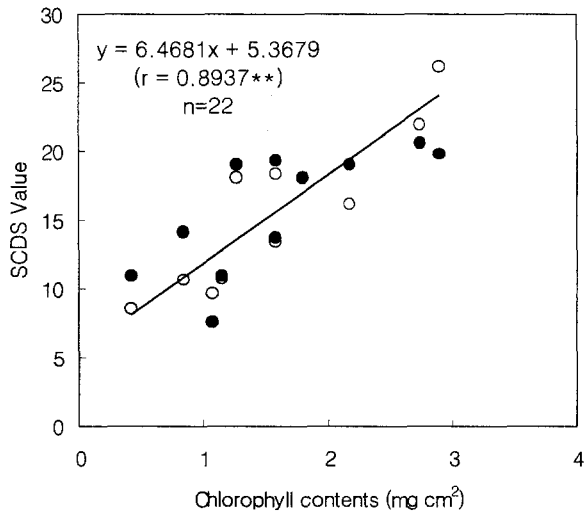


Fig. 4-50. Relationship between specific color difference sensor value (SCDSV) and chlorophyll content of lettuce leaves in hydroponics (○:Grand; ●:Omega).

** means significance at 1% level

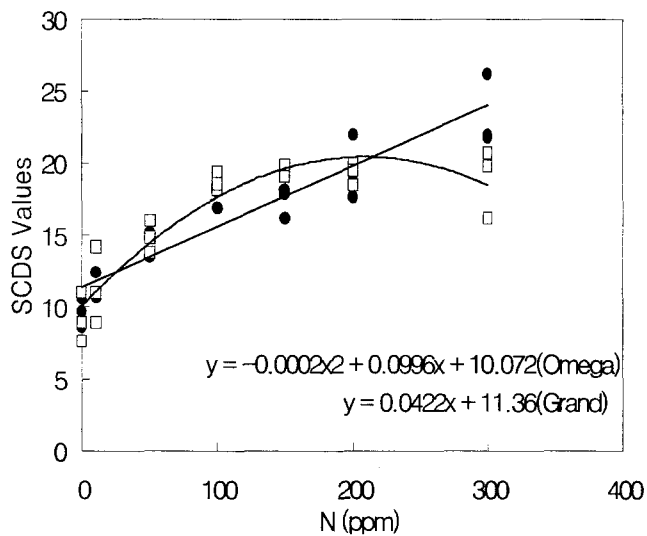


Fig. 4-51. Relationship between SCDS and nitrogen content of the nutrient solution (○:Grand; ●:Omega).

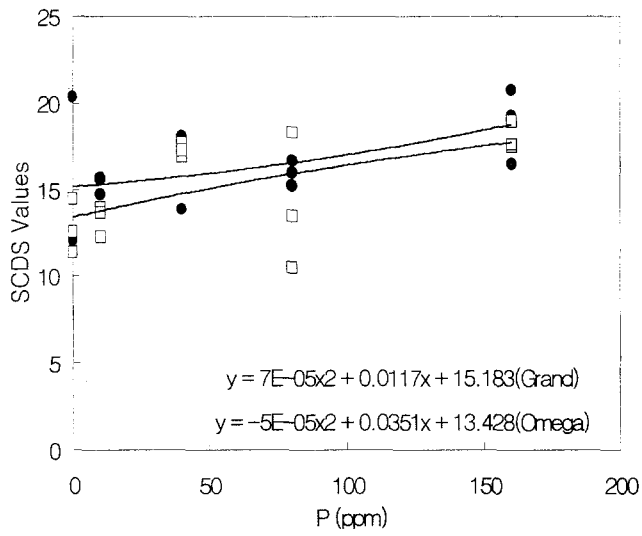


Fig. 4-52. Relationship between SCDS and phosphorous content of the nutrient solution (○:Grand; ●:Omega).

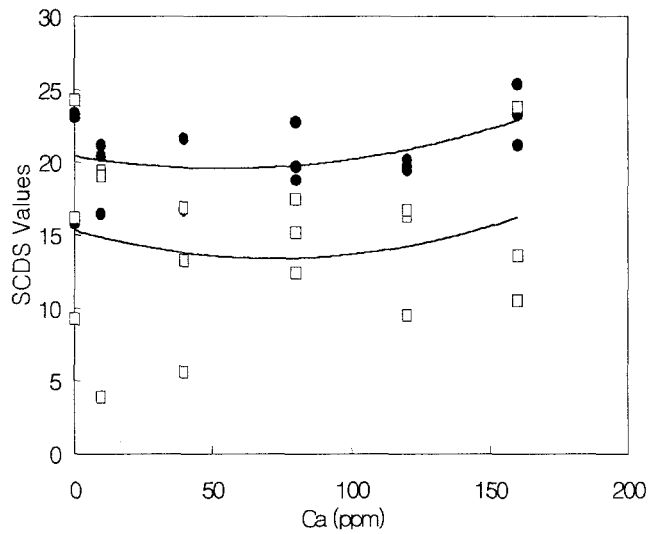


Fig. 4-53. Relationship between SCDS and calcium content of the nutrient solution (○:Grand; ●:Omega).

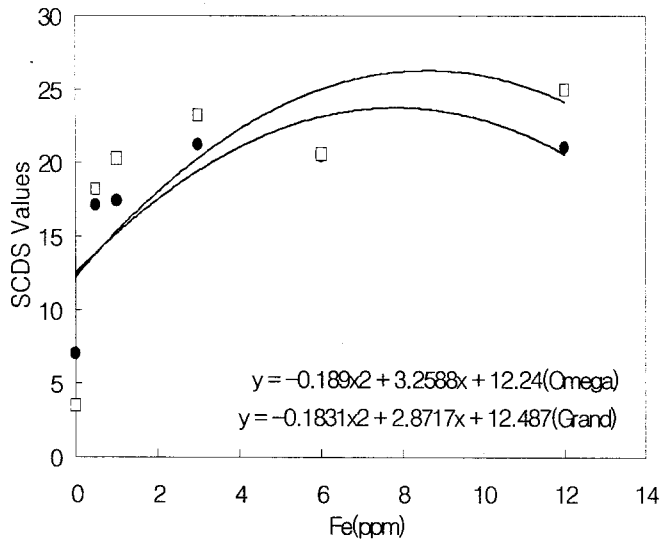


Fig. 4-54. Relationship between SCDS and iron content of the nutrient solution (○:Grand; ●:Omega).

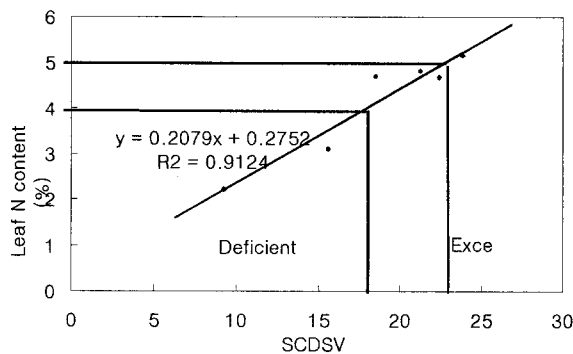


Fig. 4-55. Relationship between specific color difference sensor value (SCDSV) and nitrate content of lettuce leaves in hydroponics.

2) 비파괴적인 N 영양진단

질소농도가 150mgL^{-1} 까지 증가됨에 따라 증산량, 광합성, SCDSV, 생육량의 증가경향을 나타냈고 300mgL^{-1} 수준에서 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 반면에 엽록소함량은 질소농도 증가에 따라 계속 증가되는 경향을 나타냈으며 기공저

항은 100-200mgL⁻¹수준에서 최저치를 나타냈다. SCDS값 광합성, 증산량, 생육량을 2차식으로 나타냈다. 상추의 광합성과 생체중은 엽내 질소 함량이 5.5%정도될 때까지 광합성속도나 생체중이 크게 증가하였지만 5.5%이상부터는 감소하기 시작했다. 잎상추의 SCDS값과 엽내 질소 함량간에는 고도로 유의한 정의 상관을 보였다. 잎상추의 생리적 활성, 생육 및 품질을 고려해 볼 때 엽내 질소 함량의 적정 범위는 4.0-5.0%인 것으로 나타났다. 이 범위에 해당되는 SCDS값은 18-22.5였다.

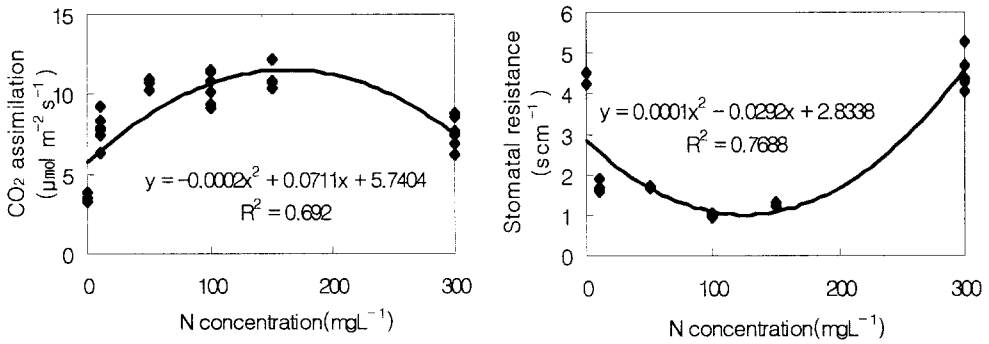


Fig. 4-56. Effect of N concentration on CO₂ assimilation and stomatal resistance in leaf lettuce 'Grand Rapids'.

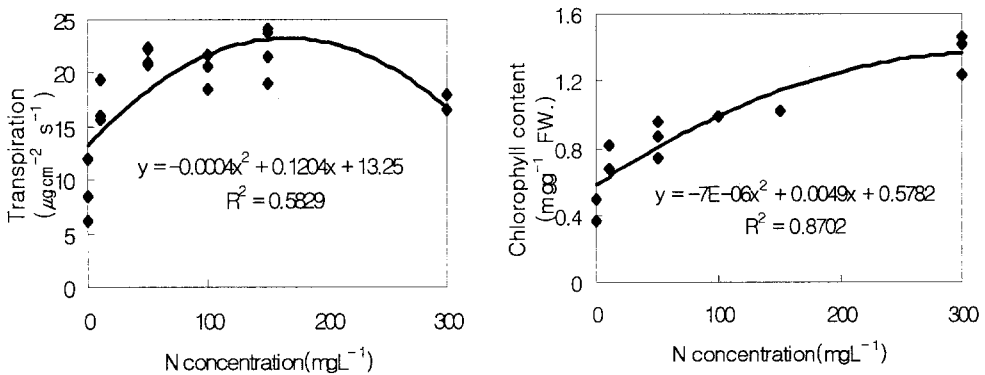


Fig. 4-57. Effect of N concentration on transpiration and chlorophyll content in leaf lettuce 'Grand Rapids'.

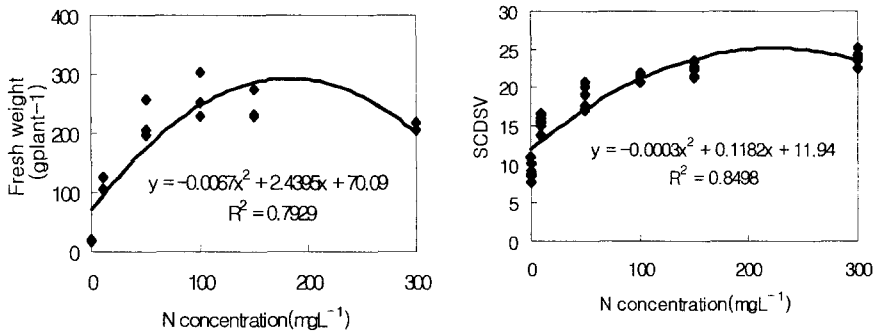


Fig. 4-58. Effect of N concentration on fresh weight and specific color difference sensor value in leaf lettuce 'Grand Rapids'.

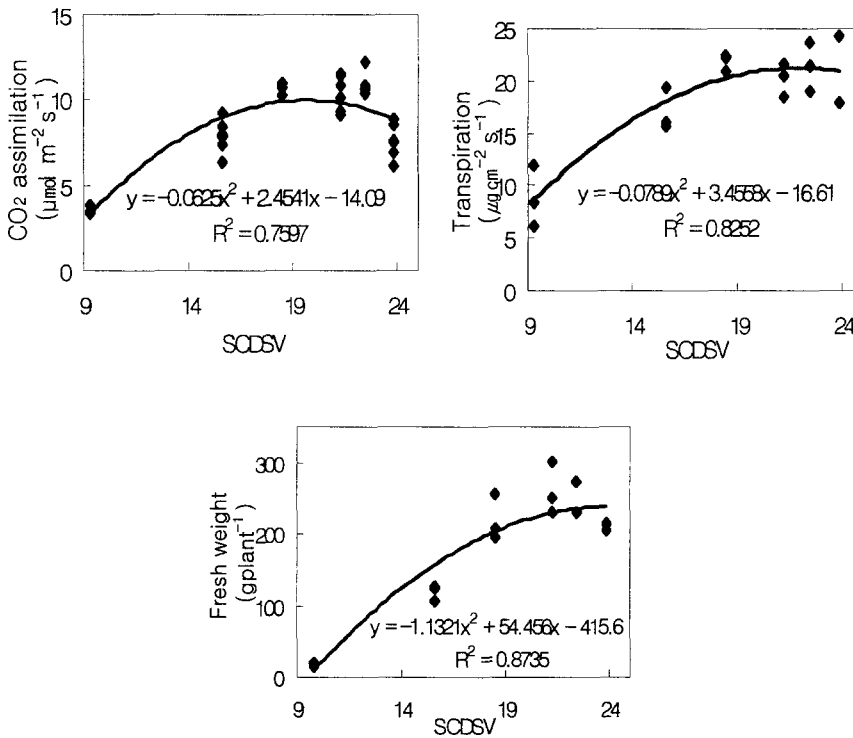


Fig. 4-59. Relation between CO₂ assimilation, transpiration and fresh weight and specific color difference sensor value(SCDSV) on the leaf lettuce

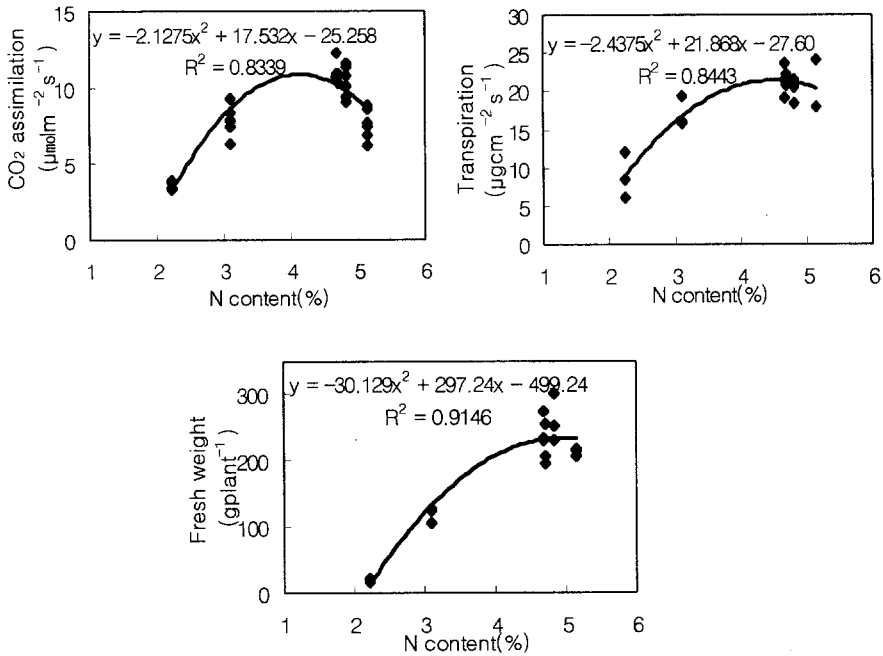


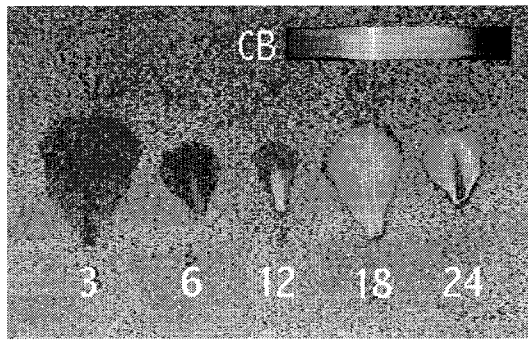
Fig. 4-60. Relation between CO₂ assimilation, transpiration and fresh weight and nitrogen content of leaf lettuce 'Grand Rapids'.

3) 비파괴적인 Ca 영양진단

배양액의 EC에 따른 칼슘의 흡수능을 측정하고자 반결구 상추에 동위원소 ⁴⁵Ca를 배양액에 24시간 관주한 후 식물체를 채취하여 Imaging plate(BAS-2040S, Fujifilm)에 감광시키고 이를 컴퓨터로 이미지화 시켜 칼슘의 분포를 색도화하고 photo stimulated luminenscence를 측정하여 칼슘의 이동과 분포를 비파괴적인 방법으로 측정하였다.

방사능의 세기는 붉은 색으로 갈수록 강한 방사능을 나타내어 ⁴⁵Ca가 많이 축적되었음을, 푸른색으로 갈수록 방사능의 세기가 낮아 ⁴⁵Ca의 흡수 및 축적이 적음을 뜻하는 것으로 EC 13.5 dS m⁻¹에서는 모든 엽위에서 푸른색을 보여 ⁴⁵Ca의 흡수가 전혀 이루어지지 않았다. EC 9.0 dS m⁻¹는 엽맥에 약간의 노란색을 보여 칼슘 이동이 어느 정도 진행되었으며 EC 4.5 dS m⁻¹에서는 엽맥에 붉은색을 보여 ⁴⁵Ca의 흡수가 진행 중 있었으며, 성장점으로부터 5엽까지는 엽맥에서 2/3 지점까

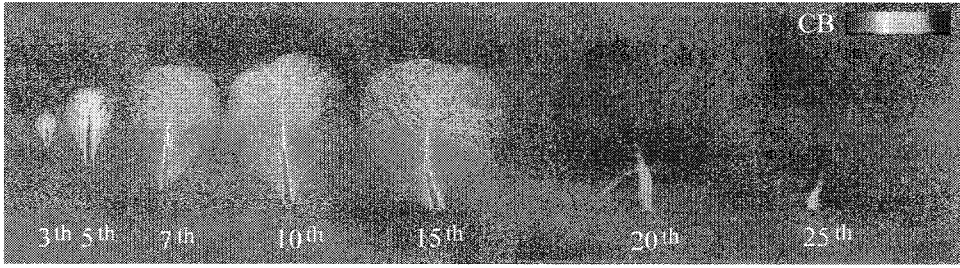
지 노란색을 보여 칼슘의 축적이 이루어졌음을 보였다. 한편 EC 1.5 dS m⁻¹에서는 하위엽인 11엽위까지 엽맥을 따라 엽 중앙부분에 노란색을 보여 칼슘의 이동이 생장점에서 하위엽으로 이동되고 있음을 단적으로 보여주었다. 정단부로부터 3번째 잎에 흡수된 방사능이 일으키는 형광작용의 상대적 강도를 1mm²에 대한 PSL값을 엽 부위에 수치화한 결과 엽맥 부위의 PSL값이 가장 높았으며, 다음은 엽 가장자리로 칼슘이 상향 이동하여 엽신의 PSL값이 낮아 칼슘의 이동은 엽맥을 따라 엽 가장자리로 상향 이동함을 확인할 수 있었다. EC에 따라서도 PSL값은 차이를 보여 9.0 dS m⁻¹와 13.5 dS m⁻¹에서는 엽맥과 엽가장자리, 엽신의 PSL 값이 비슷하여 칼슘의 흡수가 거의 이루어지지 않았다. 그러나 EC 1.5 dS m⁻¹의 엽맥 PSL은 31.49로 EC 4.5 dS m⁻¹에 비해 2.9배 높았다. 한편 EC 1.5 dS m⁻¹의 엽가장자리 PSL은 16.08임에 비해 EC 4.5 dS m⁻¹의 PSL은 1.79로 9배나 높은 반면 엽신은 5.6배 차이를 보여 EC 4.5 dS m⁻¹는 엽맥으로의 칼슘 흡수가 이루어지지만 엽가장자리와 엽신으로는 높은 EC로 인해 칼슘 이동이 억제됨을 확인할 수 있었다.



Time (hr)

Plate 4-6. Changes in accumulation of ⁴⁵Ca in butterhead lettuce 'Omega' over time.

The photo-stimulated luminescence of radiotope ⁴⁵Ca was quantified in the imaging photograph using a color density scale, as indicated by the color bar (CB) in the plate. The greatest accumulation of ⁴⁵Ca is indicated by order of color, red, yellow, green and blue. Red means more translocation of ⁴⁵Ca than yellow.



Leaf position from the apex

Plate 4-7. Effect of leaf position in the specific activity of ^{45}Ca in butterhead lettuce 'Omega' grown in nutrient solution at 1.5 dS m^{-1} .

CB: See plate 1 for comprehension of color intensity.

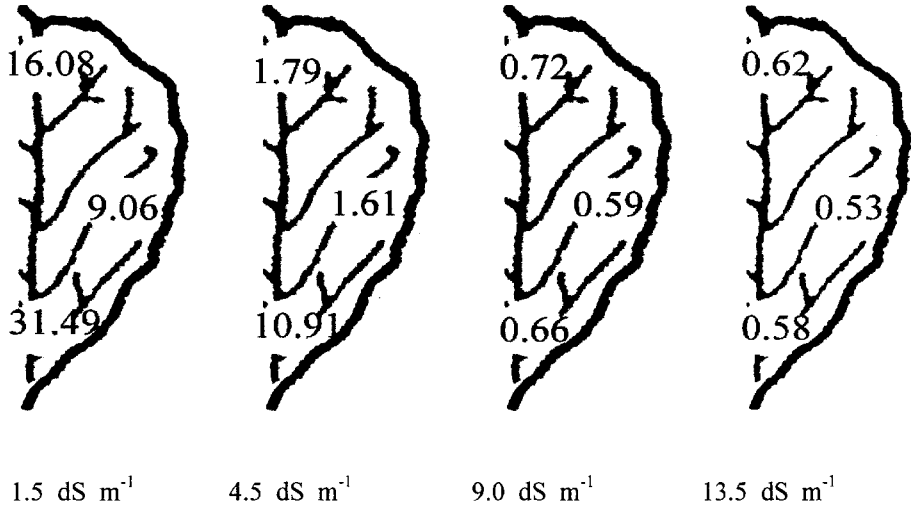
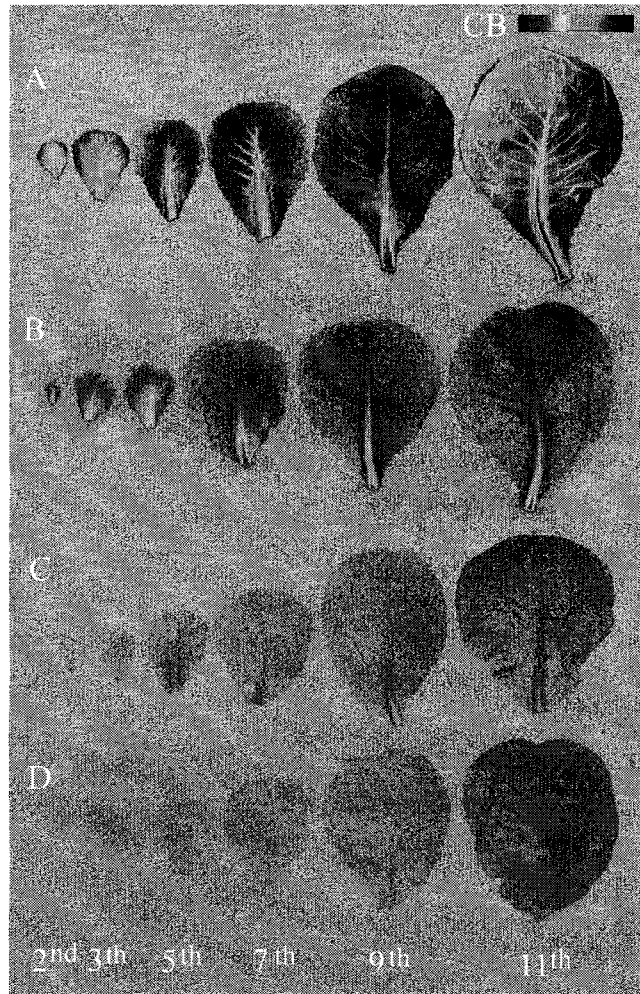


Fig. 4-61. Effect of electrical conductivity of nutrient solution on photo-stimulated luminescence (PSL) of ^{45}Ca in different parts of butterhead lettuce 'Omega'.

Values in leaf were expressed as PSL of ^{45}Ca per mm^2 .



Leaf position from the apex

Plate 4-8. Effect of electrical conductivity of nutrient solution on translocation and accumulation of ^{45}Ca in butterhead lettuce 'Omega'.

EC levels are indicated as 1.5 dS m^{-1} (A), 4.5 dS m^{-1} (B), 9.0 dS m^{-1} (C) and 13.5 dS m^{-1} (D).

CB : See Plate 1 for comprehension for color intensity.

나. 배양액 관리기술에 따른 생체반응 및 영양진단.

1) 엽채류

상추의 배양액 이온 제어가 반결구상추와 잎상추의 생육에 미친 영향을 보기 위해 엽수, 엽장, 엽폭, 생체중을 조사하였다. 처리 10일에는 공시작물 모두 증류수만 보충한 처리가 다른 처리보다 생체중이 증가하였지만 건물중에는 차이가 없는 것으로 나타났다.

Table 4-55. Effect of management on growth of lettuce at 10 days after treatment.

Management	No. of Leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g·plant ⁻¹)	Dry weight (g·plant ⁻¹)
----- Omega -----					
DW ^z	18.33 b ^v	13.92 a	12.90 a	21.19 a	1.24 a
CM ^y	20.00 a	13.87 a	11.43 b	19.29 b	1.26 a
MN ^x	20.33 a	13.20 a	11.30 b	19.46 b	1.25 a
ML ^w	19.67 a	12.13 b	10.40 c	18.37 c	1.23 a
----- Grand Rapids -----					
DW	11.67 b	16.27 a	11.63 b	20.47 a	1.24 a
CM	12.67 a	12.33 b	12.07 b	19.08 b	1.22 a
MN	13.00 a	11.83 b	10.77c	19.62 b	1.22 a
ML	12.67 a	12.17 b	12.60 a	18.67 b	1.21 a

^zManagement by distilled water addition.

^yManagement by pH and EC measurement.

^xManagement by nutrient solution analysis.

^wManagement by nutrient solution and leaf analysis.

^vMean separation with in columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

증류수 처리에서 이러한 결과는 다른 비료염이 추가되지 않고 증류수만 보충하여 EC저하로 배양액내 삼투압이 낮아져 수분 흡수가 많이 이루어진 것으로 판단된다. EC 보정 처리와 나머지 무기이온 처리들간의 생육은 큰 차이를 보이지 않았다. 처리 20일에는 증류수만 보충한 처리에서는 공시작물 모두 생육 전반에 걸

처 생육이 급격히 저하되었다. 반결구상추에서는 EC처리, 잎상추에서는 이온보정을 해준 다른 처리들보다 높은 생육을 나타내기 시작했다. (Table 4-56)

Table 4-56. Effect of management on growth of lettuce at 20 days after treatment.

Management	No. of Leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g·plant ⁻¹)	Dry weight (g·plant ⁻¹)
----- Omega -----					
DW ^z	24.33 c ^y	18.30 c	13.60 c	59.98 c	2.41 c
EC ^y	27.08 a	22.63 a	16.10 b	81.11 a	3.78 a
MN ^x	26.91 b	20.87 b	17.40 b	78.09 b	3.33 b
ML ^w	28.67 a	19.67 b	18.93 a	77.68 b	3.36 b
----- Grand Rapids -----					
DW	13.33 b	22.63 a	16.43 b	55.50 c	2.38 b
EC	17.67 a	24.90 a	18.87 a	70.11 b	3.45 a
MN	17.33 a	23.07 a	18.53 a	71.63 b	3.56 a
ML	17.02 a	23.53 a	20.80 a	74.93 a	3.48 a

^zManagement by distilled water addition.

^yManagement by pH and EC measurement.

^xManagement by nutrient solution analysis.

^wManagement by nutrient solution and leaf analysis.

^vMean separation with in columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

처리 30일에는 증류수만 보충해준 처리에서 엽색이 심하게 얼어지고, 잎상추의 경우에는 경엽이 연약해져서 도복현상이 나타나 식물체 지탱조차 어려웠다. 이온보정을 해준 처리들이 두 품종 모두에서 EC 보정 처리보다 높게 나타났다. 특히 반결구 상추에서는 이온 보정과 엽분석 후 보정 처리의 생체중이 높게 나타났으며, 잎상추에서는 이온보정 처리와 이온보정과 엽 분석 후 보정 처리간의 차이가 없었다.

Table 4-57. Effect of management on growth of lettuce at 30 days after treatment.

Management	No. of Leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g·plant ⁻¹)	Dry weight (g·plant ⁻¹)
----- Omega -----					
DW ^z	27.33 c ^y	18.32 b	12.60 c	59.96 d	2.73 c
CM ^y	37.02 b	23.43 a	17.12 b	126.67 c	3.12 b
MN ^x	42.33 a	24.71 a	20.70 a	151.76 b	4.01 a
ML ^w	45.21 a	24.20 a	21.63 a	172.93 a	4.17 a
----- Grand Rapids -----					
DW	18.02 c	22.80 b	15.40 c	57.27 c	2.92 c
CM	24.67 b	24.31 a	19.30 b	121.55 b	3.78 b
MN	25.33 b	23.72 a	19.90 b	156.96 a	4.17 a
ML	27.41 a	23.23 a	23.53 a	159.50 a	4.13 a

^zManagement by distilled water addition.

^yManagement by pH and EC measurement.

^xManagement by nutrient solution analysis.

^wManagement by nutrient solution and leaf analysis.

^yMean separation with in columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

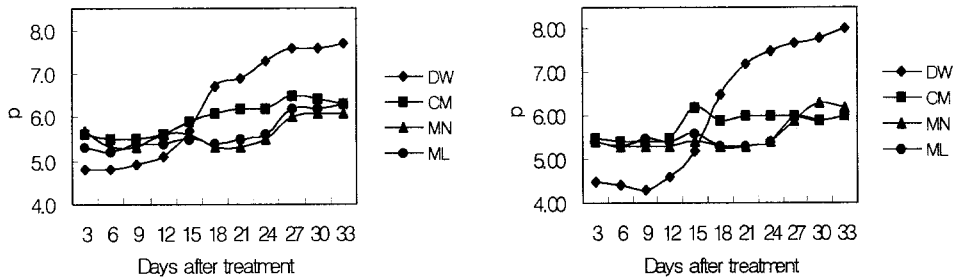


Fig. 4-61. Changes in pH of nutrient solution of butterhead 'Omega'(left) and leaf lettuce 'Grand rapids'(right) depending control of nutrient solution. Legends see Table 4-57.

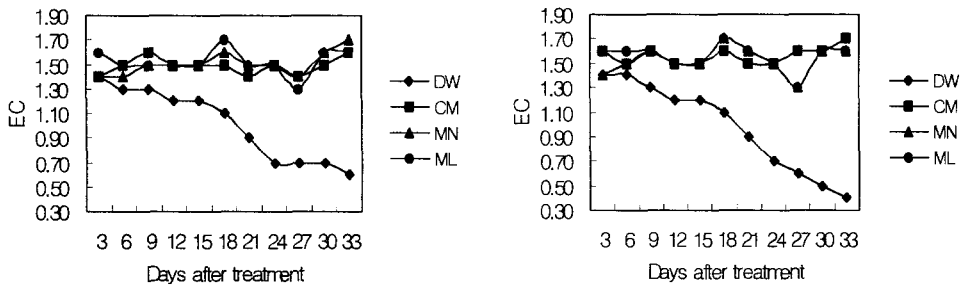


Fig. 4-62. Changes in EC of nutrient solution of butterhead 'Omega'(left) and leaf lettuce 'Grand rapids'(right) depending control of nutrient solution. Legends see Table 4-57.

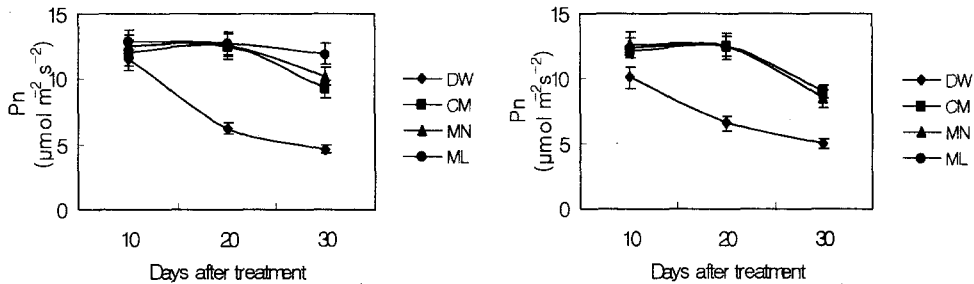


Fig. 4-63. Changes in photosynthesis (Pn) in expanded leaves of butterhead 'Omega'(left) and leaf lettuce 'Grand rapids' (right) depending control of nutrient solution. Legends see Table 4-57.

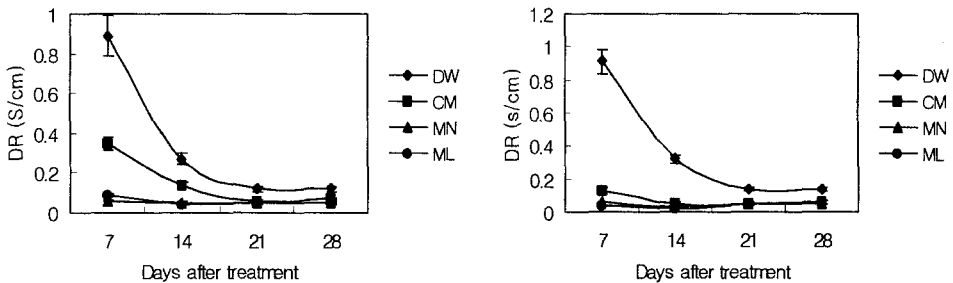


Fig. 4-64. Changes in diffusive resistance (DR) in expanded leaves of butterhead 'Omega'(left) and leaf lettuce 'Grand rapids'(right) depending control of nutrient solution. Legends see Table 4-57.

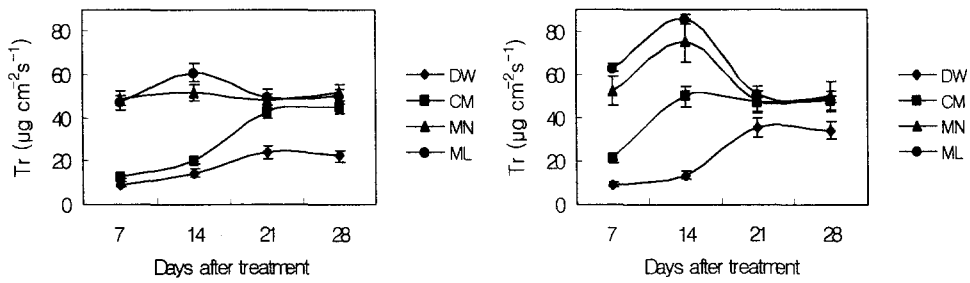


Fig. 4-65. Changes in transpiration rate (Tr) in expended leaves of butterhead 'Omega'(left) and leaf lettuce 'Grand rapids' (right) depending control of nutrient solution. Legends see Table 4-57.

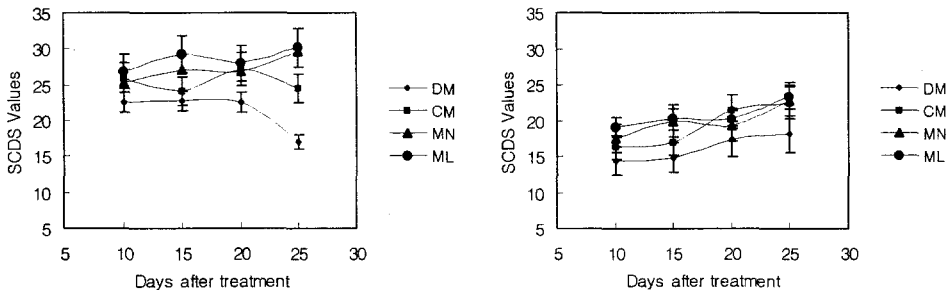


Fig. 4-66. Changes in Chlorophyll content of expended leaves of butterhead 'Omega' (left) and leaf lettuce 'Grand rapids' (right) depending control of nutrient solution. Legends see Table 4-57.

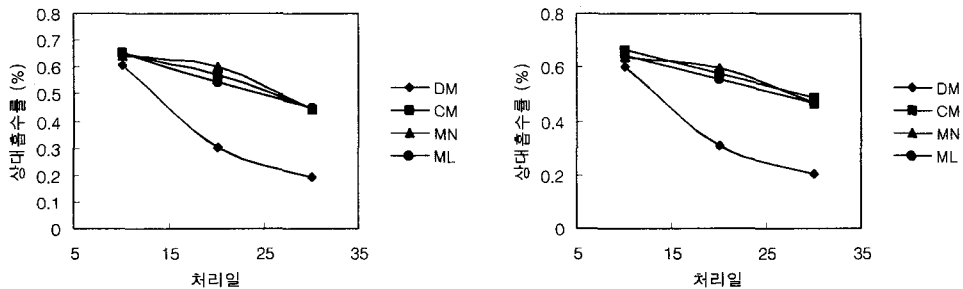


Fig. 4-67. 배양액 보정 처리에 따른 반결구 상추와 잎상추의 배양액내 질소의 상대적인 흡수율 변화

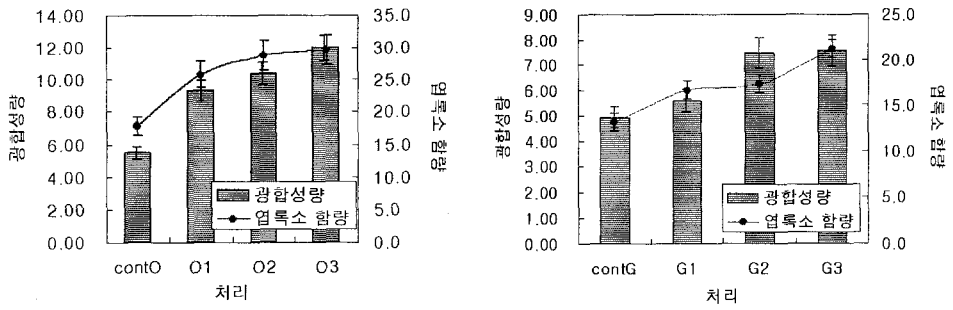
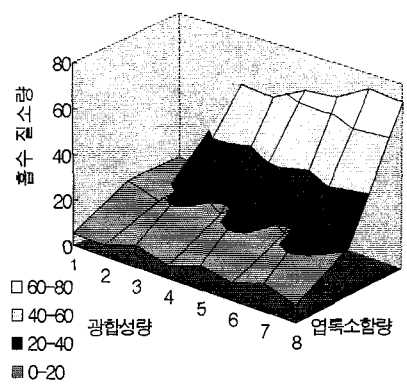
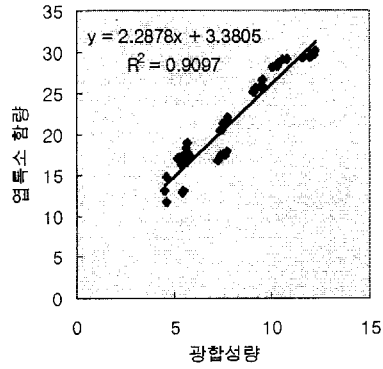


Fig. 4-68. 배양액 보정 처리에 따른 반결구 상추와 잎상추의 광합성과 엽록소 함량값의 변화



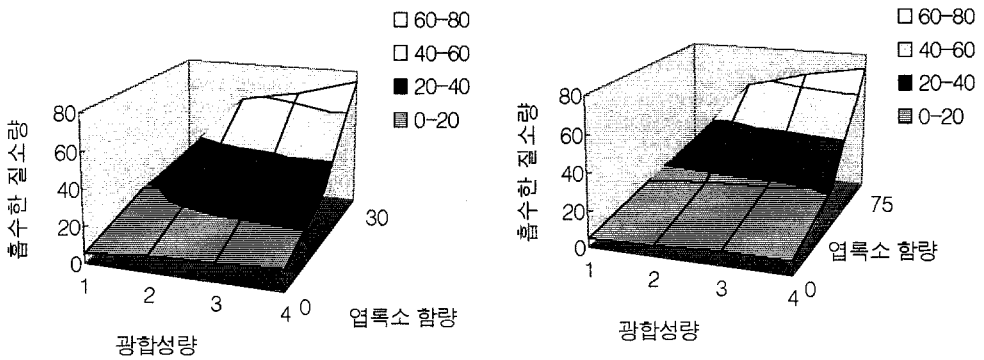
광합성량과 엽록소함량과 흡수 질소량과의 상관성

Fig. 4-69. 배양액 보정 처리에 따른 반결구 상추와 잎상추의 배양액내 흡수한 질소량과 광합성, 엽록소 함량과의 상관



엽록소 함량과 광합성량과의 상관성

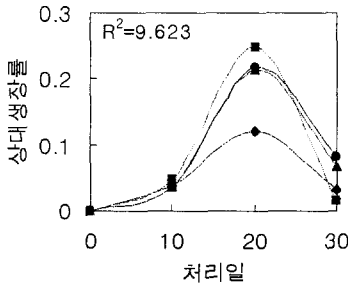
Fig. 4-70. 반결구 상추의 엽록소 함량과 광합성량의 상관성



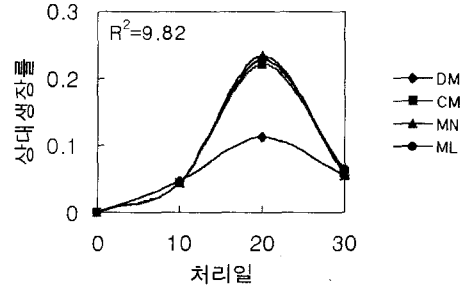
반결구 상추에서 상관성

앞상추에서 상관성

Fig. 4-71. 배양액 보정 처리에 따른 반결구 상추와 앞상추의 배양액내 흡수한 질소량, 광합성, 엽록소 함량과의 상관

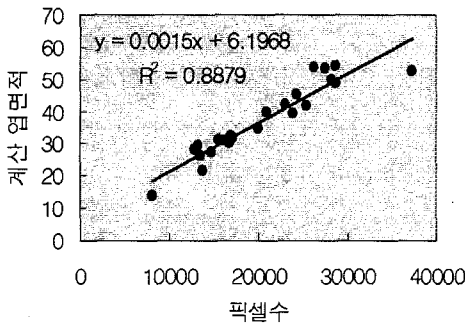


반결구 상추에서 상대생장률 추이

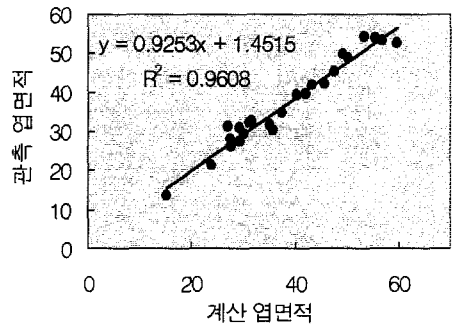


앞상추에서 상대생장률 추이

Fig. 4-72. 배양액 보정 처리에 따른 반결구 상추와 앞상추의 상대생장률 변화



픽셀수와 엽면적과의 상관



계산엽면적과 관측엽면적과의 상관

Fig. 4-73. 반결구 상추와 앞상추의 엽면적 측정값과 픽셀 수(왼쪽), 엽면적 측정값과 관측된 엽면적과의 상관

2) 과채류

오이의 순환식 배지경에서 순환식으로 개발된 오이 배양액을 사용하여 근권내 각 무기이온을 처음 공급액과 동일한 수준으로 배양액을 4가지 방법으로 계속 조절해 주었을 때 전 재배기간 동안 다량원소 즉, N, P, K, Ca, Mg이온만을 제어한 처리구(Macro)를 제외하고는 전기전도도(EC)가 작은 폭으로 차츰 감소되는 경향을 보였다. pH는 기존의 관행방식인 전기전도도로 근권배양액을 조절하는 EC처리구에서 변화폭이 가장 크고 재배기간 동안 차츰 낮아지는 경향을 보였지만 다른 세 처리구에서는 pH 변화폭이 작고 적정수준으로 잘 유지되었다(Fig. 4-77).

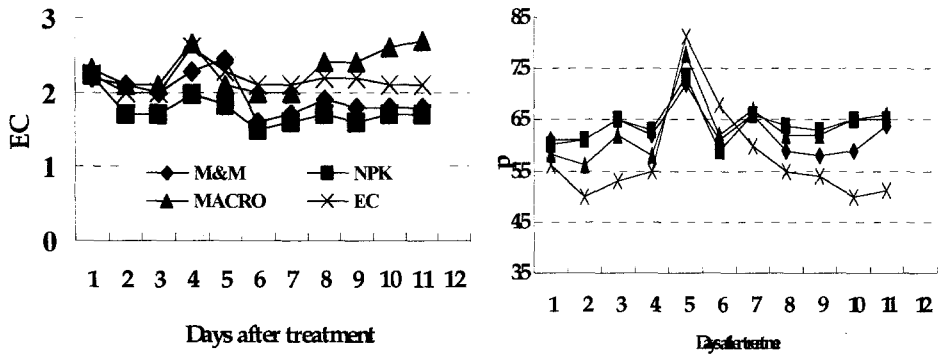


Fig. 4-77. Changes of pH and EC in root zone applied with the control of mineral nutrients in substrates.

재배기간동안 각 처리구의 근권내 배양액을 기준농도로 조절하기 위해 (5월27일부터 조절) 총 공급된 비료량은 작물에게 필요한 모든 이온을 다 제어해준 처리구 (macro & micro)에서 가장 많았으며 배양액의 기본 EC(전기전도도)로 제어한 처리구에서는 다른 처리구에 비해 N, P, K의 비료성분이 적게 공급된 것으로 나타났다 (Table 4-58). 조, 심등(1998)은 상추 NFT재배시 배양액 농도를 EC로만 관리했을 때 배양액내 Ca와 SO₄는 축적되고 NO₃-N, P, K 함량은 감소한다고 하였는데 본 실험에서는 N, P, K 성분이 감소한 것은 같은 경향이나 Ca, Mg이 다른 처리구에 비하여 많이 축적되지는 않았는데 이는 본 실험에 사용된 배양액은 순환식에 적합하게 생육단계별로 양·수분 흡수 패턴을 고려하여 조성되었기 때문으로 여겨진다.

Table 4-58. The nutrient concentration supplied to the nutrient solution depending on the control of mineral nutrients. (Unit: mg · L⁻¹)

Treatment	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg
MM	587.9	71.61	128.4	802.6	257.7	96.6
N,P,K	542.0	70.73	107.1	738.2		
Macro	494.3	67.1	116.8	657.7	189.7	88.7
E C	303.0	42.0	62.58	454.2	211.3	116.3

배양액의 무기이온제어 방법에 따른 증산량은 처리간에 큰 유의성을 나타내지 않았으나 광합성은 다량원소 및 미량원소 조절구에서 가장 높았고 그 다음이 N,P,K처리구, 다량원소, EC 조절구 순이었다. 기공저항은 다량원소 및 미량원소 조절구에서 가장 낮게 나타났다.

Table 4-60. Effects of the control of mineral nutrients on CO₂ assimilation and transpiration rate of cucumber leaves.

Treatment	CO ₂ assimilation rate (mol m ⁻¹ s ⁻¹)	Stomatal resistance (S cm ⁻¹)	Transpiration rate (mol m ⁻² S ⁻¹)	Diffusive resistance (S cm ⁻¹)
MM	16.99	0.30	16.30	0.67
NPK	16.32	0.27	13.31	1.83
Macro	17.57	0.24	16.09	0.69
EC	12.73	0.26	12.51	1.16

^zMean separation within columns by Duncans multiple range test, 5% level

상품수량은 미량원소는 제어해주지 않은 N, P K 처리구와 N, P, K, Ca, Mg처리구 보는 macro & micro 처리구와 EC처리구에서 높게 나타났다(Table 4-60). 이것은 전이온 농도만을 알 수 있는 EC로만 배양액을 관리했을 경우 수량이 낮게 나왔던 현재까지의 무기이온제어 실험결과와는 (Cho, Shim, 1999) 다르게 나타났다. 그 이유는, 본 실험에서는 EC조절구에서 이미 순환식에서 생육단계별로 오이의 이온흡수 특성에 알맞은 배양액(UOSC 배양액)을 사용하였기 때문에 근권내에서 다른 처리에 비해 EC조절구가 N, P, K가 적게 공급이 된 것은 두 실험결과와 일치하였지만 Ca, Mg은 과잉으로 공급되지 않았다. 따라서 미량원소를 전혀 제어하지 않은 다른 조절구 보다 macro & micro 처리구와 EC처리구에서 수량이 높게 나타난 것으로 보인다.

Table 4-60. Effects of particular nutrient controls on the yield of cucumber.

Treatment	Average fruit weight (g)	Fruit length (cm)	Fruit diameter (cm)	No. of total fruit	Total yield (gplant ⁻¹)	No.of makeable fruits	Makertable yield (g plant ⁻¹)
M&M	152	24.3	3.2	36	1825	34	1705
NPK	159	23.7	3.21	29	1535	26	1372
Macro	162	24.4	3.19	28	1510	27	1479
EC	179.7	25	3.41	29	1737	28	1669

^zMean separation within columns by Duncans multiple range test, 5% level

근권내 배양액을 전기전도도(EC)가 아닌 각 기준 이온농도로 재배기간 동안 일정하게 조절, 유지시켜주기 위해 5월 27일 부터 제어를 시작하여 시기별로 요구되어진 근권내 각 이온의 농도를 나타내었다(Fig. 4-78). NO₃-N은 영양생장기인 6월 8일 이전까지 30-100 ppm의 농도로 순차적으로 차츰 요구되다가 6월 8일 이후 생식생장기 기준농도로 이온제어를 시작한 뒤 수확기까지 60-100 ppm 수준의 농도로 일정하게 요구되었다. NH₄-N은 수확기이전까지 2-15 ppm으로, PO₄-P도 역시 영양생장기에서 수확기 이전까지 5-25 ppm 수준으로 순차적으로 요구되었다. K 의 경우 80-140 ppm 농도로 영양생장기에서 수확기 이전까지 가장 많이 요구되었으며 Ca, Mg은 생식생장기 이후부터 가장 높은 농도수준인 각 80-120 ppm 까지 요구되었다.

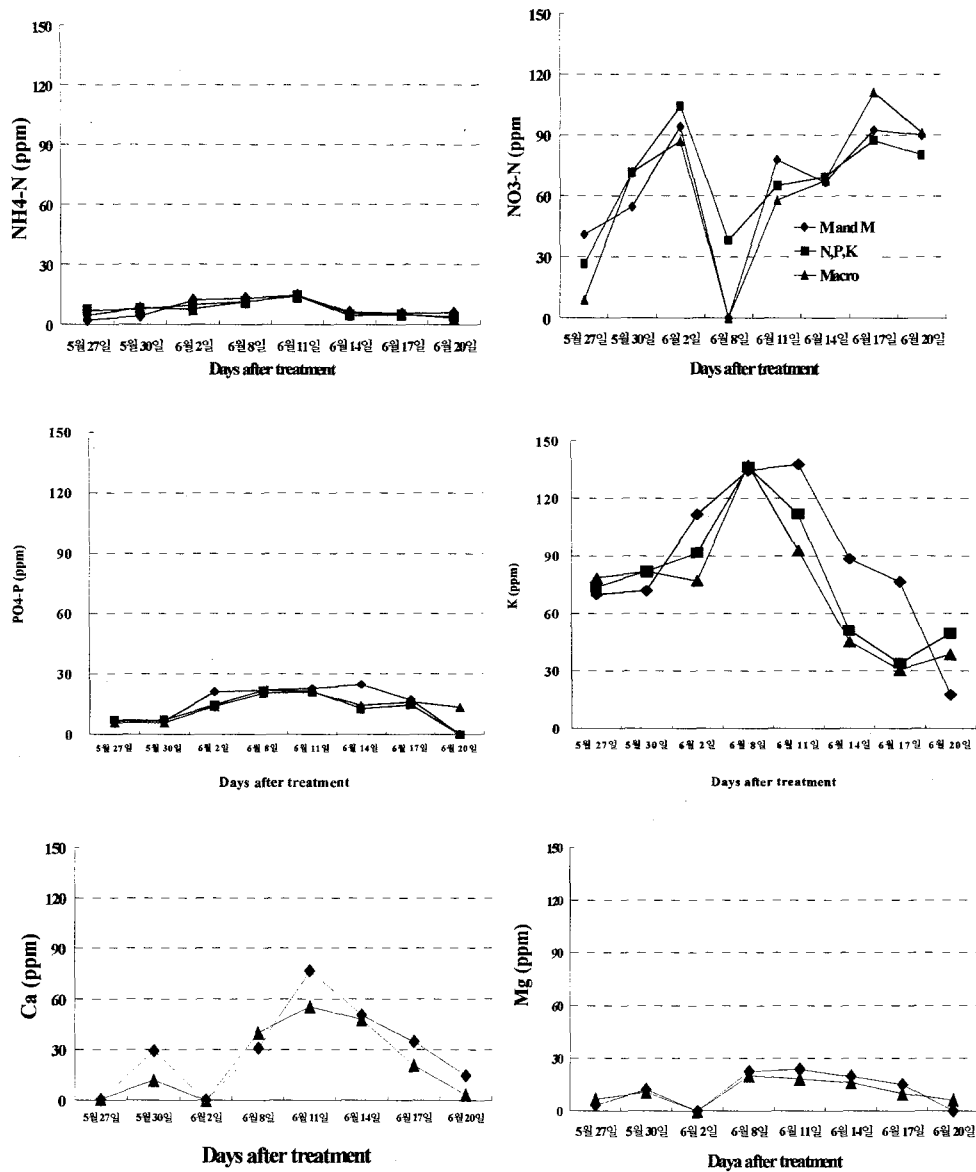


Fig. 4-78. Macro-nutrient concentration absorbed by plants after the day of nutrient control, May 27th.

3. 적 요

적색광과 근적외광 파장에서의 잎의 흡광도차를 구하여 엽록소를 측정하는 간이 엽록소 측정장치를 이용한 상추의 비파괴적인 영양진단 가능성을 검토하였다. 질소를 비롯한 다량원소와 미량원소를 농도별로 처리하여 검토한 결과 상추의 SCDSV값과 엽내 질소 및 철함량간에 정의상관을 보였다. 또한 배양액의 EC에 따른 칼슘의 흡수능을 측정하고자 반결구 상추에 동위원소 ^{45}Ca 를 배양액에 24시간 관주한 후 식물체를 채취하여 Imaging plate(BAS-2040S, Fujifilm)에 감광시키고 이를 컴퓨터로 이미지화 시켜 칼슘의 분포를 색도화하고 photo stimulated luminescence를 측정하여 칼슘의 이동과 분포를 비파괴적인 방법으로 측정하였다.

상추와, 오이를 공시작물로 하여 양액재배에서 행해지고 있는 EC 보정과 배양액 분석을 통한 이온 보정 등의 배양액 관리 기술에 따른 양분흡수 특성과 생육 등의 특성을 조사하였다. 효율적인 배양액 관리 체계를 구축하고자 식물의 배양액내 무기이온 흡수 패턴과 생육, 엽록소값, 광합성, 증산량의 상관관계를 통한 요인 분석을 하였다.

제 5 장 환경보존형 배양액관리 자동화 시스템 및 신소재 개발

제 1 절 식물공장내 성장환경 및 배양액 지식베이스의 rule 구축

1. 재료 및 방법

rule 구축을 위하여 기존에 연구된 성장환경 및 배양액 조건에 관한 단편 자료를 수집하였다. 1950년에서 현재까지 발표된 상추에 관한 문헌중 CAB 요약집(영연방 농업국 발행, 1987-1995)과 관련 잡지 등을 이용하여 광도, 광주기, 기온, 근온, CO₂ 농도 등의 환경인자에 관한 논문을 발췌한 다음, 환경인자에 따라 분류하고 환경인자 각각에 대하여 연구결과를 정리하였다.

자료가 주어졌을 때, 이들을 표시할 수 있는 함수들의 집합에서 가장 적합한 함수를 찾아내는 data fitting 방법으로는 Lagrange 3차 다항식, 또는 3차 spline으로 구할 수 있다. 그러나, 이러한 방법들은 자료를 도출하는 과정에서 필연적으로 발행하는 오차로 인하여 본래 함수에 없었던 진동(oscillation)이 근사함수 내에 들어오게 된다. 따라서, 주어진 자료에 꼭 일치되는 근사함수를 찾기보다는 오히려 주어진 자료를 가장 적합하게 표현하는 최적의 근사함수를 찾는 것이 더 바람직하다.

최적의 근사함수를 구하기 위하여 오차를 최소화시키는 최소자승법(least square method)과 최대최소법(minimax method), 그리고 절대편차를 최소화시키는 방법 등이 있으나, 오차의 통계적 분포에 대한 검토와 사용의 용이성 등에 비추어 최소자승법이 data fitting에 있어서 일반적으로 많이 사용된다. 즉, 절대편차 방법은 절대치 함수의 미분이 불가능하다는 어려움이 있고, 반면에 최소자승법은 비편견 어렵값(unbiased estimates)의 도출이 가능하며 아울러 그 값들은 분포와 관련된 변량의 비편견 어렵값을 구할 때 사용할 수 있다는 장점이 있다(Ortega, 1972; Wendroff, 1966).

따라서, 본 과제에서는 조사된 환경인자를 종합적으로 정리한 다음, 연구되지 않은 사항중 지식베이스의 규칙에 필요한 사항에 대하여는 가상치를 부여한 후, 최소자승법을 이용한 data fitting 기법(Gerald, 1984)을 이용하여 체계화하고 있다. 일련의 작업을 위하여 SAS, STATMOST, MS EXCEL 등을 이용하였다.

2. 결과 및 고찰

가. 자동 생산 시스템 운영

1) 자동제어를 위한 제어계측기의 설치

가) 계측센서의 제원 설정

Table 5-1. Optimum conditions for environment and nutrient solution from literature survey.

	육묘기	재배기
광도(lux)	1500 < 8000-15000 < 20000	1500 < 10000-20000 < 25000
광주기(시)	12<16~18<20	12~14<18~20<24
기온(낮/밤) (°C)	발아: 18 < 21 < 26	8 < 15-20/10-15 < 27
	육묘: 8 < 15-20/10-13 < 27	
근온 (°C)	8 < 15/10 < 20	8 < 15/10 < 20
CO2 농도 (ppm)	대기농도	550 < 800~1000 < 1000
습도 (%RH)	60 < 80 < 90	60 < 80 < 90
EC (mS/cm)	0.8 < 1.2 < 1.5	1.2 < 1.5-1.8 < 2
pH	4.7-5.2 < 6.0-6.5 < 7	4.7-5.2 < 6.0-6.5 < 7

* 하한 < 최적치 < 상한

Table 5-2. Features of sensors

입력항목	인가전원	측정범위	입력값 범위
CO ₂	DC 12 V	0~2000ppm	0-2V
광도	DC +7.5 - +12 V 12 mA	0~3000 μ mol/m ² /sec	0-1V
대기 온도	DC +12 - +24 V	-10~38℃	4-20mA
습도	DC +12 ~ +24 V	0 - 100% RH	4-20mA
배양액 온도	AC 220V	-10 - 50℃	4-20mA
pH	DC 20 V ±25% 40 mA	0~14	4-20mA
EC	DC 20 V ±25% 40 mA	0~12.34	4-13.9mA

나) INTERFACE configuration

대략적인 시스템의 구성은 다음과 같다.

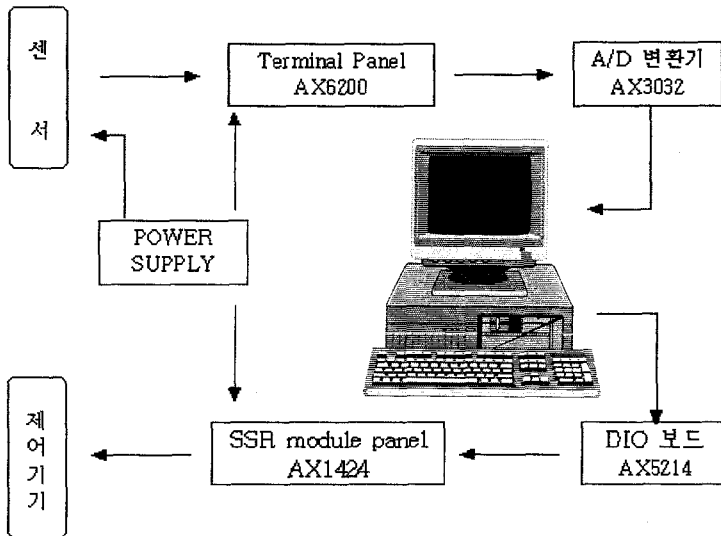
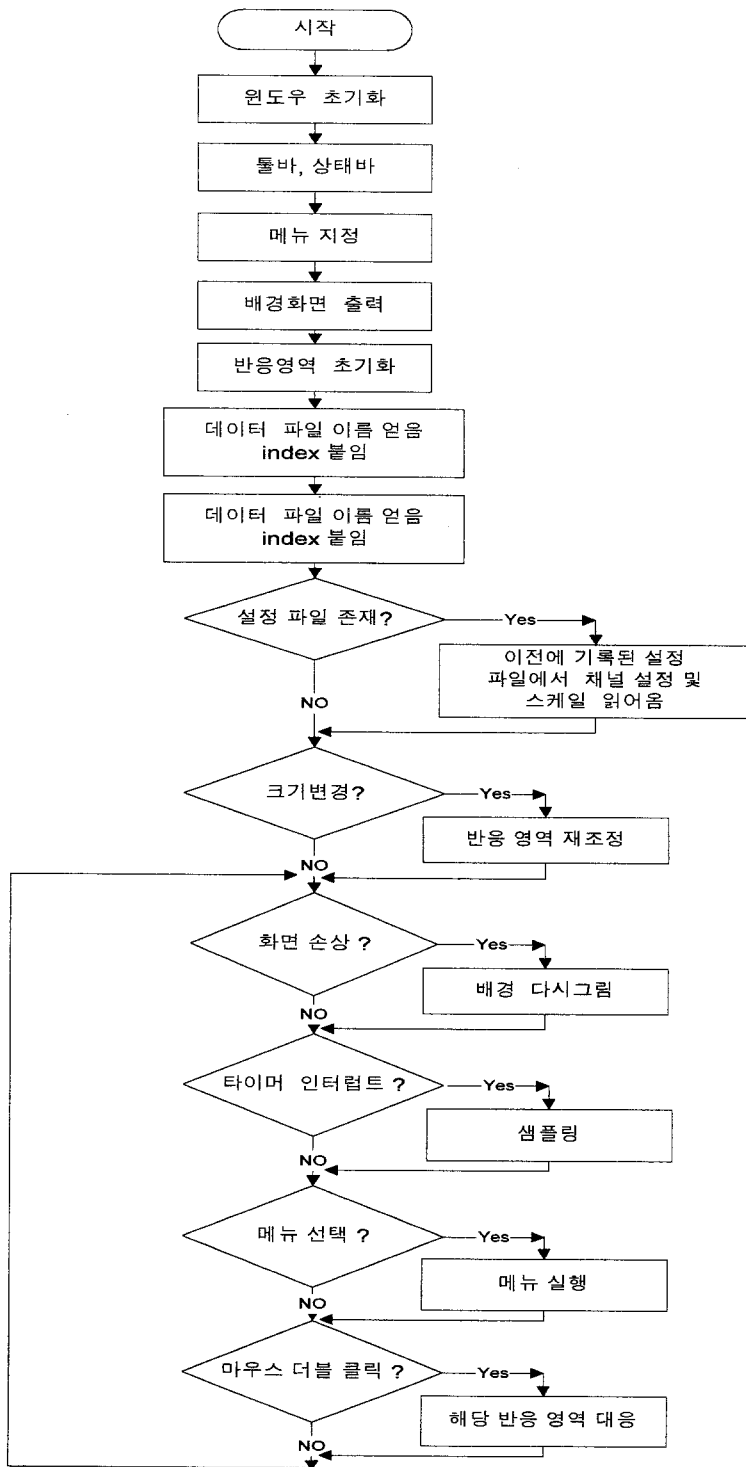


Fig. 5-1. Overall structure of cultivation management expert system

2) 기본 software 구성

프로그램은 편리한 GUI 환경을 제공하고 기타 프로그램과의 연계를 위하여 윈도우 환경에서 개발되었다. 사용된 DOS의 버전은 6.2, 윈도우의 버전은 3.1이었으며, 프로그램은 윈도우95에서 테스트되었다. 프로그램은 마이크로소프트사의 Visual C++에 의하여 개발되었으며, 프로그램 개발을 위하여 MFC(Microsoft Foundation Class) 라이브러리를 제공한다. 계측자료로는 광, 이산화탄소, 기온, 습도 등의 환경자료와 pH, EC, 액온 등의 배양액 관련 자료 등을 받아들일 수 있도록 하였다. 센서는 총 32개까지 설정할 수 있도록 하였다. 제어장치는 천창, 측창, 환기팬, 유동팬, 탄산가스발생기, 배양액공급펌프, 농축비료공급펌프, 산 펌프, 알칼리펌프, 전등 등으로 구성되도록 하였다. 초기화면에는 시스템 설정, 센서조정, 온실상태, 주변기기제어 등의 메뉴표시줄 및 온실내부가 나타나며, 시스템의 운영은 툴바, 상태바를 사용할 수도 있으며, 온실내부의 각 부분에 대하여 pop up menu를 사용할 수도 있게 하였다.

다음은 프로그램 전체의 흐름도이다.



3. 적요

생장환경 및 배양액 인자 rule 구축을 위해서 단편 자료를 체계화하고 그 체계화된 단편자료를 수집하여 수치변환 하였다. 수집된 단편 자료들을 모델화하여 생장함수를 작성하였다. 식물을 생산하기 위한 최적의 환경 조건을 구명하고 rule을 구축하였다. 재배에 의한 규칙을 체계화하였고 시설재배에 적용하기 위해서 규칙 인자를 체계화하고 그 규칙을 적용하였다. 최적 환경 조건에 맞추어 배양액 조건도 구명하고 rule을 구축하였다. 식물의 자동 생산을 위한 시스템 설계 및 운영을 위해서 prototype의 재원을 설정하고 그것을 구축하였다. 자동 제어를 위한 제어 계측기를 설치하여 계측센서와 조절기기의 재원을 설정하였다. 자동제어 계측기에 적합한 hardware를 구성하여 계측 체계를 구축하였다. hardware에 따른 기본 software를 감시와 통제가 가능한 프로그램으로 작성하였다.

신뢰도 또한 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

나. 지식 습득 단계

이 단계는 개념화 단계라고도 하며, 개념적인 모델(conceptual model)을 구성하기 위해서 적절한 형태로 전문가의 지식을 끌어내어 표현하는 단계이다. 본 연구에서는 배양액 관리에 오랜 경험이 있는 전문가와 대화 등의 방법을 통해서 배양액 관리에 필요한 영역 지식을 습득하여 정리함으로써 재배 관리 분야에 비전문가인 전문가 시스템 개발자가 쉽게 전문 지식을 활용할 수 있도록 하였다.

다. 설계 단계

이 단계는 표현화 단계라고도 하며, 개념적인 모델이 일단 구축되면 그 모델을 어떻게 구현할 것인가를 결정하는 단계로서, 지식을 표현하는 적절한 방법과 추론 메카니즘을 선택하고, 시스템의 전체적인 구조를 설계하게 된다. 본 연구에서는 재배 관리 전문가 시스템의 전체적인 구조를 그림 5-1와 같이 설계하였다.

2. 결과 및 고찰

가. 배양액 자동 공급 장치

장치는 크게 4부분 즉, 용수공급부분, 농축배양액공급부분, 배양액공급부분 및 재순환부분으로 나누어 개발하였다. 장치의 개략적인 모식도는 그림 5-4와 같다.

① 용수공급부분(그림 5-3): 용수(지하수, 수도, 빗물 등)를 받는 용수통은 온실내에 두어 액온이 항상 식물이 원하는 온도범위에 있도록 하였다. 용수는 이물질이

많을 가능성이 있으므로 여과기를 병렬로 설치하여 공급의 단절이 없도록 배려하였다. 용수에 철분 등 침전을 일으키기 쉬운 물질이 많을 경우에는 용수통에 폭기장치를 설치하여 용수통내에서 침전을 만들 수 있도록 배려한다. 배양액 혼합통의 수위센서에 의해 용수공급펌프가 작동하여 공급되도록 하였다. 혼합통의 보수, 급액관의 청소 등의 경우를 대비하여 용수공급관에서 직접 급액관으로 용수가 공급될 수도 있게 하였다. 용수펌프가 정지하여도 압력이 없어질 때까지 용수가 혼합통내로 들어가는 현상을 방지하기 위하여 여과기 다음에 전자변을 장착하여 정밀하게 제어가 되도록 하였다.

② 농축배양액공급부분(그림 5-5): 정량펌프를 이용한 방식은 정밀도는 높으나 다량의 배양액을 단시간에 공급할 경우에는 용량이 부족한 결점을 갖고 있으며, 벤츨리형 등은 정밀도가 낮은 관계로 농축배양액을 공급하는 펌프는 항상 작동시키다가 3방변을 이용하여 원하는 경우에만 혼합통으로 공급되게 하거나, 작동후 일정시간후에 3방변을 통하여 공급되게 하였다. 배양액의 pH를 조절하는 펌프는 2개를 장착하여 pH의 시간에 따른 예기치 않은 변화도 보정하도록 하였다.

③ 배양액공급부분(그림 5-6): 배양액 공급을 제어하는 센서로는 일사계, pH센서, EC센서, 유량계 등을 기본으로 장착하되, 열화가 빠른 pH 및 EC센서는 병렬로 장착하고 보수할 경우에도 장치가 원활히 작동되도록 배려하였다. 공급제어는 시간제어와 일사제어를 병행할 수 있게 하였다. 일회에 공급하는 액량도 제어하도록 하였다. 농가와 달리 정밀한 제어를 요구하는 경우를 위하여 급액관 속에 들어 있는 배양액만큼의 오차도 없애기 위하여 새로운 배양액 조성이 공급될 경우에는 급액관내에 존재하는 배양액을 회수하는 라인을 배려할 수 있도록 하였다. 급액관은 16개까지 설정할 수 있도록 하였다. 혼합통내의 배양액의 교반을 별도 장치없이 가능하도록 바이패스를 구성하였다.

④ 재순환부분(그림 5-7): 순환식의 경우에는 배액의 집액통에서 일정수위가 되면 혼합통으로 재공급되도록 고안하였으며, 이 경우 혼합통의 수위는 비순환식에서의

수위제어체계와는 별도로 작동되게 하여 옵션으로 장착하도록 하였다. 집액의 공급관을 용수의 공급관과 연결하는 경우에는 집액통에 배액이 없을 경우 펌프가 공운전을 할 염려가 있으므로 직접 혼합통으로 유입되도록 하였다. 재순환부분은 기계식으로 개발하여 본체의 자동장치와는 완전히 별도 구성이 가능하도록 하므로써 농가의 선택폭을 높이는 동시에 제어가 용이하도록 하였다. 즉, 순환식의 경우라 하더라도 초기 혹은 비상시에는 재순환되지 않는 것이 좋은데 이 경우에도 제어장치를 변경하는 것은 오히려 불편을 가중시킬 수 있으므로 별도 제어가 바람직한 것으로 보았다. 순수수경의 경우에는 배양액의 공급량의 상당부분이 재순환되므로 혼합통을 집액통으로 하고 부족분은 용수통에서 공급되도록 하였다. 이 경우 새로운 제어알고리즘을 작성하는 번거로움을 없애기 위하여 기계적으로 변경할 수 있도록 고안하였다.

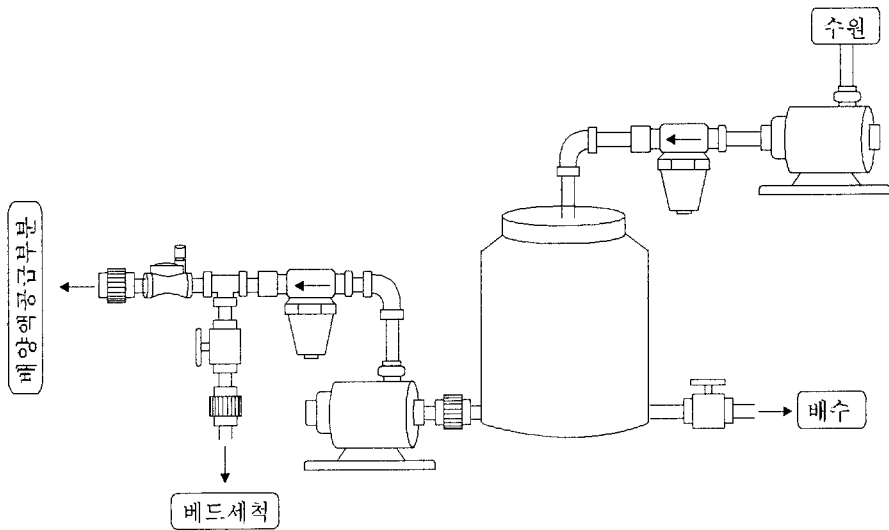


Fig. 5-3. Water supply part

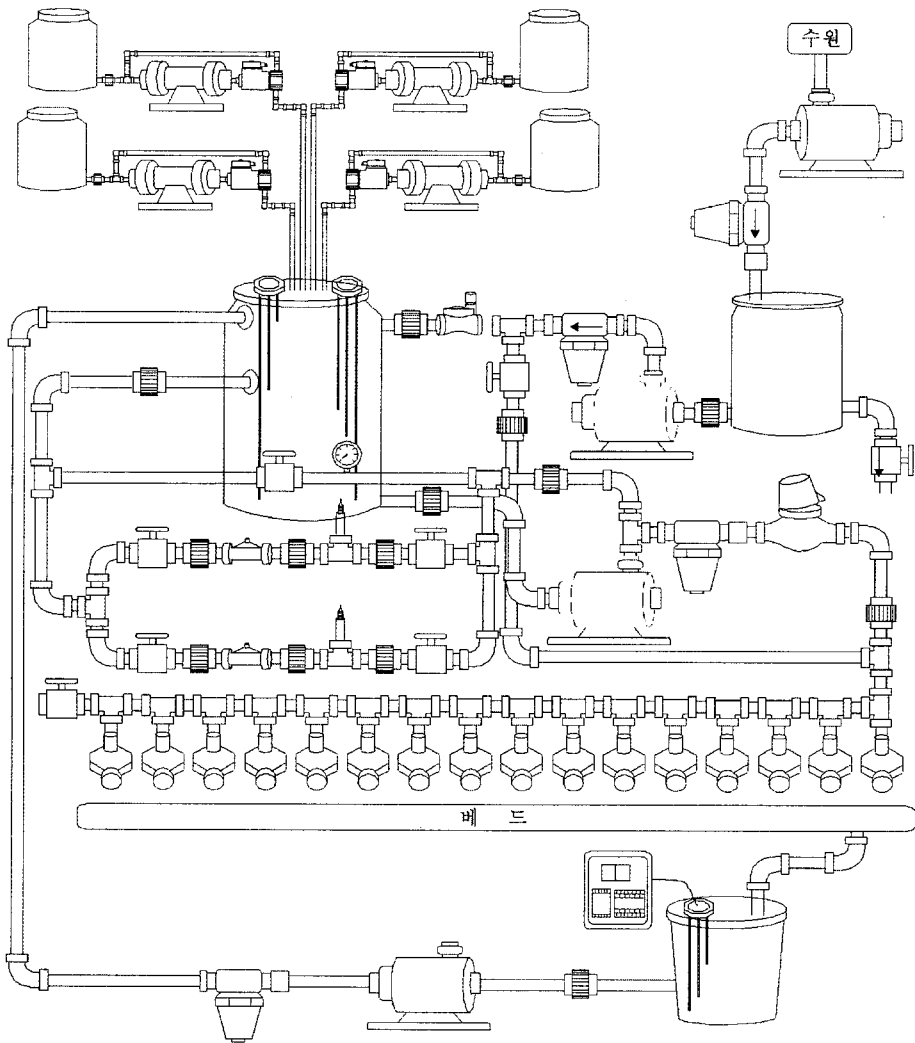


Fig. 5-4. Automatic nutrient solution supply system

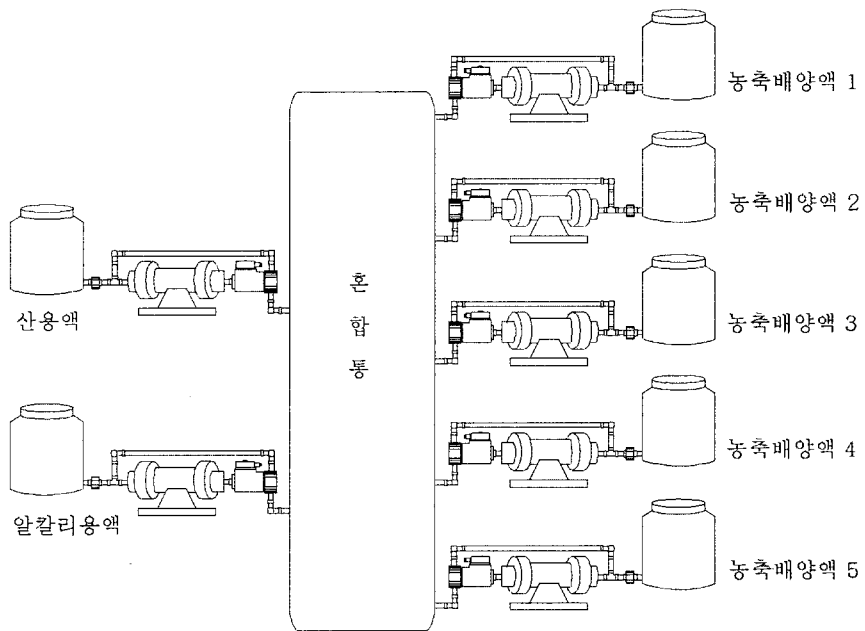


Fig. 5-5. Stock solution supply part

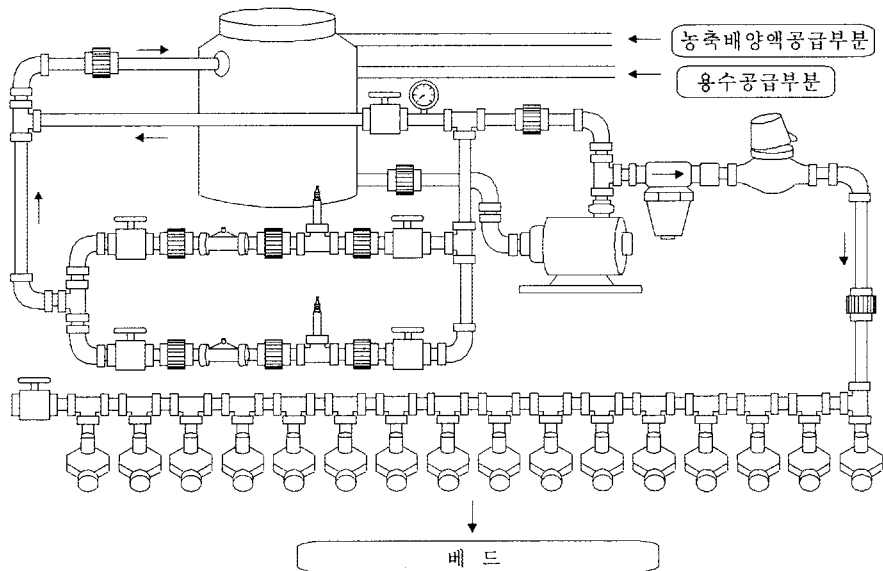


Fig. 5-6. Nutrient solution supply part

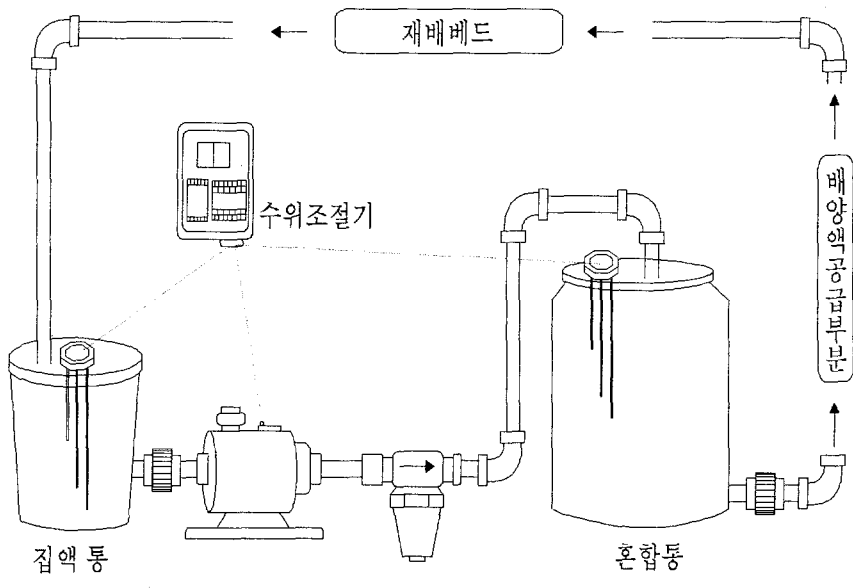


Fig. 5-7. The recycling part

나. 배양액 자동 제어 논리

장치의 원활한 작동을 위하여 다음과 같은 논리를 설정하였다.

1) 배양액제어 원리

조절요소	전문가 시스템	계측상태	제어항목 (우선순위 순서)	참 고
배양액 공급	× ○	타이머에 의해 작동	배양액 공급펌프	작동시간은 주야, 생육단계, 일사량, 기온별로 설정 수위가 하한치 이하이면 정지 1분이상 수위가 하한치 이하이면 경고
용수 공급	×	수위가 하한치보다 낮을 때 설정:수위조절기	용수펌프	수위가 높아지지 않으면 경고(1분 이상) 수위가 상한치가 되면 공급 정지
EC 제어	× ○	상한치 이상일 때 설정: 임의	용수펌프 작동	EC가 제어가 안될 때 경고(1분 이상)
		하한치 이하일 때 설정: 임의	농축펌프 작동	EC가 제어가 안될 때 경고(1분 이상)
pH 제어	× ○	상한치 이상일 때 설정: 임의	산펌프 작동	제어가 안될 때 경고(1분 이상)
		하한치 이하일 때 설정: 임의	알칼리 펌프 작동	제어가 안될 때 경고(1분 이상)
근온	× ○	상한치 이상일 때 설정: 임의	냉각수 펌프 작동	제어가 안될 때 경고(30분이상) 액온의 설정치는 주야, 계절별로 다름
		하한치 이하일 때 설정: 임의	온수기 작동	제어가 안될 때 경고(30분이상) 액온의 설정치는 주야, 계절별로 다름
경보	×	경보를 울릴 것인지 여부는 제어program에서 제어할 수 있게 한다. 경보는 제어가 불가능할 때, 정전일 때, 침입자가 있을 때 울린다. 수동으로 정지할 수 있게 한다		

※ 각 조절요소의 상하한치 설정은 전문가시스템과 제어program에서 동시에 제어할 수 있게 한다. 전문가시스템이 불완전하거나 연결되지 않을 때도 있는 것을 감안한다.

2) 배양액 공급 제어 방법

- 시간표에 의한 공급
- 시간표에 의하여 기본적으로 공급하되 적산일사량에 의한 보조공급을 추가
- 과거의 환경자료를 기본으로 작성한 금액 간격 database에 의거한 공급
 생육단계별, 계절별로 기본적인 금액간격을 설정

다. 성장환경 및 배양액 인자 지식베이스 구축

본 연구에서는 전문가 시스템 개발 도구인 CLIPS 6.0과 C 언어를 이용하여 재배 관리 전문가 시스템을 개발하여 PC/WINDOWS 환경에서 사용할 수 있도록 하였다.

1) 사용자 인터페이스

현재까지 개발된 프로토타입 시스템에서는 각각의 환경 요소값들과 기타 재배 관리에 필요한 정보를 사용자가 직접 대화방식(interactive)으로 입력하도록 구현하였다.

2) 지식베이스

본 전문가 시스템의 지식베이스는 환경 요소를 제어하는 부분과 양액 요소를 제어하는 2개 부분으로 나누어 구성하였으며, 지식은 규칙(production rule)과 객체(object)의 형태로 표현되는데, 재배 관리를 위한 전문 지식은 다음 형태의 규칙들로 표현된다: IF <조건> THEN <행위1>. 규칙은 현재 가장 널리 사용되고 있는 지식 표현 방법으로, 재배 관리를 위한 지식 또한 규칙의 형태로 자연스럽게 표현될 수 있다. 그림 5-8은 CLIPS로 작성된 규칙의 예이다.

또한, 시스템의 효율적인 유지 보수를 위해서 환경 및 양액 요소의 제어 과정을 각각의 조절 요소별로 별개의 모듈로 구현함으로써 객체 지향 프로그래밍 기법의 효율성을 도입하였다. 환경 제어 요소의 각 모듈중 실내온도 및 광 제어 모듈의 기능은 다음과 같다.


```

(defrule DAILY::startup
  (object (is-a current-date) (month ?m) (day ?d))
  ?a <- (object (is-a sun) (month ?m) (day ?d) (sunrise ?x) (sunset ?y))
  ?b <- (object (is-a once) (value off1))
  =>
  (make-instance ?b)
  (make-instance of flag (value on))
  (focus REPEAT))

```

Fig. 5-8. Example of rules made by CLIPS

가) 실내온도 제어 모듈

실내 온도는 계측 상태가 월별 상한치보다 높거나 월별 하한치보다 낮은 경우, 천창과 측창, 환기팬, 분무기, 보온 커튼, 난방기 등을 우선 순위에 따라 적절히 제어함으로써 재배 조건에 따른 최적온도를 유지하도록 제어하게 된다. 실내 온도의 제어 모듈은 그림 5-9, 5-10, 5-11과 같다.

Fig. 5-9. Function of control module for interior temperature

```

(deffunction compare-high
  (?nam ?value)
  (any-instancep ((?tv target-value)
                  (and (eq ?tv:nam ?nam)
                       (< ?tv:high ?value)) ) )

(deffunction compare-low
  (?nam ?value)
  (any-instancep ((?tv target-value)
                  (and (eq ?tv:nam ?nam)
                       (> ?tv:low ?value)) ) )

```

그림 5-10. Class of control module for interior temperature

```
(defclass sequence2          ;; rule이 순서 제어를 위해
  (is-a USER)
  (role concrete)
  (pattern-match reactive)
  (slot value (type INTEGER) (create-accessor read-write)) )

(defclass flag              ;; control 값들(roof, side, ...)의 복사 시점 판단을
  위해
  (is-a USER)
  (role concrete)
  (pattern-match reactive)
  (slot value (type SYMBOL) (create-accessor read-write)) )

(defclass temp-cond
  (is-a USER)
  (role concrete)
  (pattern-match reactive)
  (slot condition (type INTEGER) (create-accessor read-write)) )

(defclass old-temp-cond
  (is-a USER)
  (role concrete)
  (pattern-match reactive)
  (slot condition (type INTEGER) (create-accessor read-write)) )
```

Fig. 5-11. Rule of control module for interior temperature

```
(defrule initial-control-copy
  ?t1 <- (object (is-a control) (status initial)
          (roof ?a) (side ?b) (pan ?c)
          (spray ?d) (curtain ?e) (boiler ?f))
  =>
  (make-instance of control-copy (nam temp)
                 (roof ?a) (side ?b) (pan ?c)
                 (spray ?d) (curtain ?e) (boiler ?f))
  (modify-instance ?t1 (status not-initial)) )

(defrule decide-temp-cond-value
  ?t1 <- (object (is-a old-temp-cond) (condition ?c1))
  (object (is-a temp-cond) (condition ?c2))
  ?t2 <- (object (is-a temp-control) )
  ?t3 <- (object (is-a flag))
  =>
  (if (and (or (= ?c1 3) (= ?c1 4) (= ?c1 5))
           (or (= ?c2 1) (= ?c2 2)) )
      then (modify-instance ?t2 (control 0))
          (modify-instance ?t3 (value on)) )
  (if (and (or (= ?c1 1) (= ?c1 2) (= ?c1 5))
           (or (= ?c2 3) (= ?c2 4)) )
      then (modify-instance ?t2 (control 0))
          (modify-instance ?t3 (value on)) )
  (unmake-instance ?t1))
```

나. 광 제어 모듈

① 광도 제어 모듈

광도(light)는 계측 상태가 최고치(1,400 lux)보다 높은 경우 차광막을 작동시키고, 최저치(700 lux)보다 낮은 경우 전등을 점등시킴으로써 최적의 상태를 유지할

수 있도록 제어한다. 한계 시간 내에 제어가 되지않을 때는 역시 경보기를 작동시킨다.

② 광주기 제어 모듈

광주기도 광도와 마찬가지로 계측 상태가 상한치보다 높은 경우 차광막을 작동시키고, 하한치보다 낮은 경우 전등을 점등시킴으로써 최적의 상태를 유지할 수 있도록 제어한다. 단 광주기의 상한치와 하한치는 월별로 차이가 있으며, 제어가 되지않는 경우 경보기를 작동시킨다.

Table 5-12. Class of control module for light period

```
(defclass light-cond
  (is-a USER)
  (role concrete)
  (pattern-match reactive)
  (slot condition
    (type INTEGER) (create-accessor read-write)) )

(defclass old-light-cond
  (is-a USER)
  (role concrete)
  (pattern-match reactive)
  (slot condition
    (type INTEGER) (create-accessor read-write)) )
```

Table 5-13. Function of control module for light period

```
(deffunction delete-light-cond ()  
  (do-for-all-instances ((?a light-cond))  
    TRUE  
    (send ?a delete)) )
```

Table 5-14. Rule of control module for light period

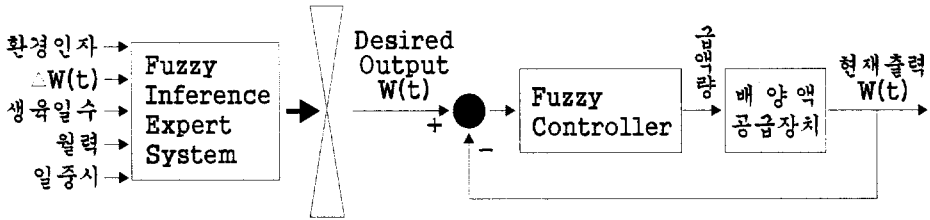
```
(defrule decide-light-cond-value
  ?t1 <- (object (is-a light-cond) (condition ?c1))
  ?t2 <- (object (is-a light-control) (control ?c2))
  ?t3 <- (object (is-a old-light-cond) (condition ?c3))
  ?t4 <- (object (is-a flag))
  =>
  (if (and (= ?c1 1)
           (or (= ?c3 2) (= ?c3 3)) )
      then (modify-instance ?t2 (control 0))
           (modify-instance ?t4 (value on)) )
  (if (and (= ?c1 2)
           (or (= ?c3 1) (= ?c3 3)) )
      then (modify-instance ?t2 (control 0))
           (modify-instance ?t4 (value on)) )
  (unmake-instance ?t3))

(defrule copy-control-values
  (object (is-a control) (status not-initial) (blackout ?a) (lamp ?b))
  ?t1 <- (object (is-a flag) (value on))
  ?t2 <- (object (is-a control-copy) (nam light))
  =>
  (make-instance of control-copy (nam light)
                 (blackout ?a) (lamp ?b))
  (modify-instance ?t1 (value off))
  (unmake-instance ?t2))
```

다. 생활환경인자의 지능제어 알고리즘 구축

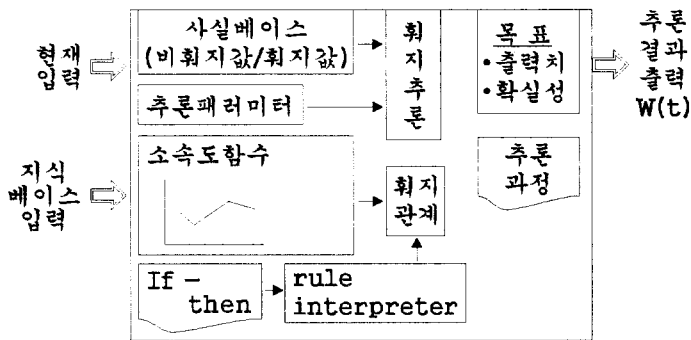
1) 계측과 제어인자간의 퍼지관계 규칙 구축

가) Fuzzy 추론으로 정확한 출력을 발생시키는 실시간 처리가능 시스템 설계



Real-time Fuzzy Expert System의 전체구성도

2) FIES의 추론 및 지식베이스 설계



FIES(Fuzzy Inference Expert System) 설계 구조

▷ Fuzzy 추론 rule의 설계

- IF Light HB & CW HB & Date LS & Mon M & Time LS
THEN Optimal_Weight HB
 - IF Light LS & CW LS & Date HB & Mon M & Time HB
THEN Optimal_Weight LS
- Time: Fuzzy label

▷ 소속함수는 Gaussian type으로 설계

▷ 추론방식은 츠카모토 방식을 사용

라. 전문가시스템에 의한 생육제어 프로그램 구축

▷ 동적 환경제어시스템과의 interface program 설계

▷ 배양액 제어에 지능제어 algorithm을 도입 설계

1) 배양액 조성 제어를 위한 퍼지 PID 제이기 구축

작물생산 시스템을 통한 동적 자동제어를 위해서는, 각종 환경요인들을 계측하고, 이를 환경제어의 피드백 신호로 활용할 수 있어야 한다. 이를 위하여 계측대상이 되는 재배 및 환경요인들을 선정하고, 온실 계측 시스템 및 모니터 프로그램을 개발하여야 한다. 본 연구에서 설계한 계측시스템은 그 동안의 연구 결과에서 나타나 있는 센서의 종류나 수의 최적화, 그리고 센서 보정의 어려움 등의 기존 문제점을 해결하기 위하여 작물 생육적인 부분을 고려하여 계측 기기의 종류와 수를 적용시키고, 시스템에 유연성을 가능한 한 부여하여 재배가 뿐만 아니라 연구자도 쉽게 사용할 수 있도록 설계하였다. 또한 작물을 재배하는데 직접 공급되는 배양액의 조성비 제어는 배양액을 구성하는 비료들과 pH 그리고 온도 등을 작물의 성장 시기와 성장상태 그리고 성장환경에 따라 적절한 구성비로 섞어주는 제어이다. 그 동안 이것은 입출력이 많고, 제어의 마지막 대상인 작물의 성장 모델링이 어려운 관계로 수동 제어 또는 단순 시간 제어를 세계적으로 사용하고 있는 실정에 있다. 그러므로 본 연구에서는 모델없이 비선형성이 강한 제어대상 시스템에 적절한 퍼지PID제어방법으로 그 동안의 문제를 완전히 극복한 적절한 배양액 조성 제어를 구현하였다.

특히 양액재배에서 그 동안 자동 제어가 불가능한 것으로 인정되어 왔던 것이 작물의 최상의 성장을 최적화하는 제어이다. 이것은 시설재배의 자동화가 추구하는 최고의 목표이기도 하다. 최근에 와서 시설재배에서 내부 또는 외부의 환경제어는 간단한 피드백 제어에 의하여 자동화를 실현시켜왔으나, 배양액의 조성 제어와 작물성장의 최적 제어는 제어 방법상의 어려운 문제에 부딪혀 제자리걸음에 머물러 있다. 특히 작물성장의 최적제어는 모든 종류의 작물이 재배환경에 대한 그 특성 변화가 매우 큰 비선형성(Non-Linearity)을 갖고 있어서 모델링이 불가능

하며, 성장시기에 따라서 동종의 작물이라도 그 특성변화가 매우 크게 나타나는 강력한 시변시스템(Time-Varying System)이다. 시변 및 비선형성이 강한 작물의 성장을 최적화하는 제어에 적응제어(Adaptive Control) 및 강인제어(Robust Control) 등을 적용하는 연구가 시도된 적도 있으나 만족한 결과를 얻지 못하였다. 그 이유는 시변성 및 비선형성이 너무 커서 적응제어나 강인제어가 극복할 수 있는 한계를 넘고 있기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는 시변성 및 비선형성이 매우 큰 작물의 성장 최적화 제어에 퍼지 전문가시스템과 퍼지 논리 제어방식을 직렬로 혼합한 새로운 제어 방식을 적용하여 시변성은 퍼지 전문가 시스템으로 비선형성은 퍼지 논리 제어방식으로 극복함으로써 작물의 최적 성장을 실현하였다. 이 때 사용한 입력은 배양액 급액으로 배양액의 배지 내 상태를 제어하고, 그것을 위한 피드백 센서로는 배양액 센서를 설계 제작하여 사용하였다.

2) 배양액의 조성 제어를 위한 퍼지 PID 제어기 개발

배양액의 조성제어는 배양액내의 pH 및 EC센서에 의한 전해도를 통하여 농축 배양액의 펌프를 조절하는 제어이다. 그러므로 배양액 조성 제어에는 2개의 병렬 제어기가 동시에 수행되어지며, 첫 번째 제어 시스템의 입출력은 출력은 pH이며, 입력은 산 또는 알칼리 용액 펌프로 정의된다. 두 번째 제어기는 출력은 배양액내의 EC이며, 입력은 배양액농축공급펌프로 정의된다. 이 제어기들의 제어 알고리즘은 일명 퍼지 PID 제어구조를 가지며 이득 파라미터의 조정 방법은 최근에 최적화 알고리즘으로 각광을 받고 있는 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)을 사용하였다.

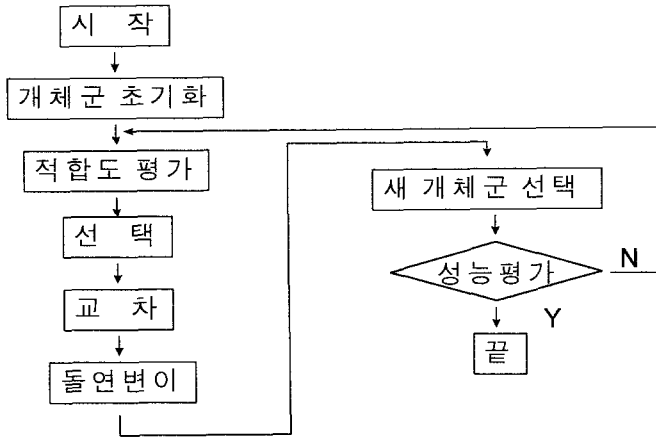


Fig. 5-8. Practical flow chart of Genetic algorithm

퍼지 PID 제어 알고리즘은 기존의 PID 제어구조에 비하여 모델식이 없어도 제어를 설계할 수 있다는 장점을 가지며 아직 식물의 성장과 배양액의 조성비와의 모델식이 완전히 정립되어 있지 않기 때문에 본 연구에서 사용한 퍼지 PID 제어기는 시설재배 자동화에서 현재까지의 원시적인 제어방식을 크게 뛰어넘는 방법이다. PID 제어 알고리즘의 구조는 그림 2와 같다. 그림에서와 같이 D-Gain은 유전자의 최적화로 처리하지 않고 Try-and-Error 방식으로 퍼지 추론기와 통합구조를 갖는다.

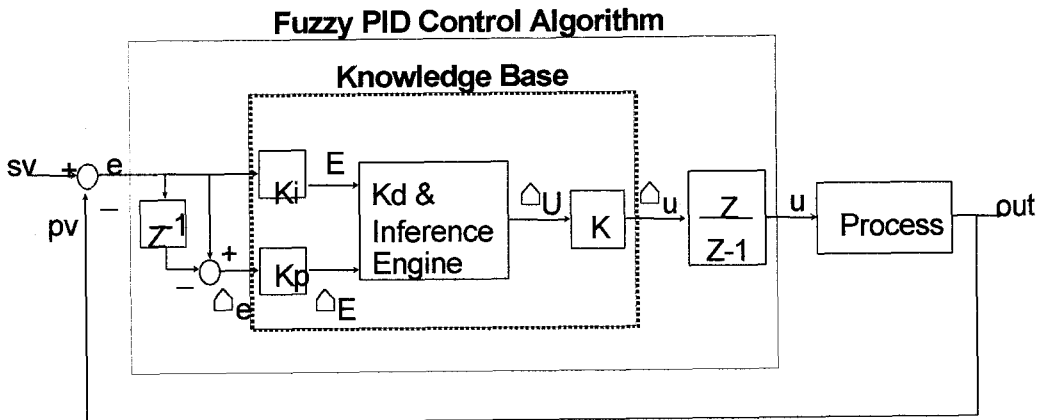


Fig. 5-9. Structure of Fuzzy PID controller for nutrient solution composition

그림 5-9는 배양액 조성제어 특히 레귤레이션 제어를 위한 제어 시스템이다. 이는 2개의 입력을 받아들여 한 개의 출력을 내보내는 2차원 퍼지 PID 제어기이다. 입력으로서는 에러 e 와 에러의 변화율 Δe 를 이용한다. 이 변수들은 다음과 같이 정의된다[2].

$$e_k = \text{setpoint (kth sample)} - \text{output (kth sample)}$$

$$\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$$

실제적인 제어 환경에서 좋은 성능을 보이기 위해서는 일반적으로 적분요소가 필요하다. 2차원의 퍼지 제어기처럼, 실제적인 FLC는 비례-적분 (PI) 제어 효과를 가지고 있다. 다음은 고전적인 PI 제어 알고리즘을 표현하고 있다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e dt$$

디지털 방식으로의 구현을 위해 위의 식은 다음과 같이 변환된다.

$$u_{k+1} = u_k + \Delta u_{k+1}$$

$$\Delta u_{k+1} = K_p \Delta e_k + K_I e_k$$

만일 e_k 와 Δe_k 가 퍼지 변수이면, 위의 식은 퍼지 제어 알고리즘이 된다. 그러므로, 실제적인 퍼지-PI 제어 알고리즘은 다음의 식으로 나타낼 수 있다[2].

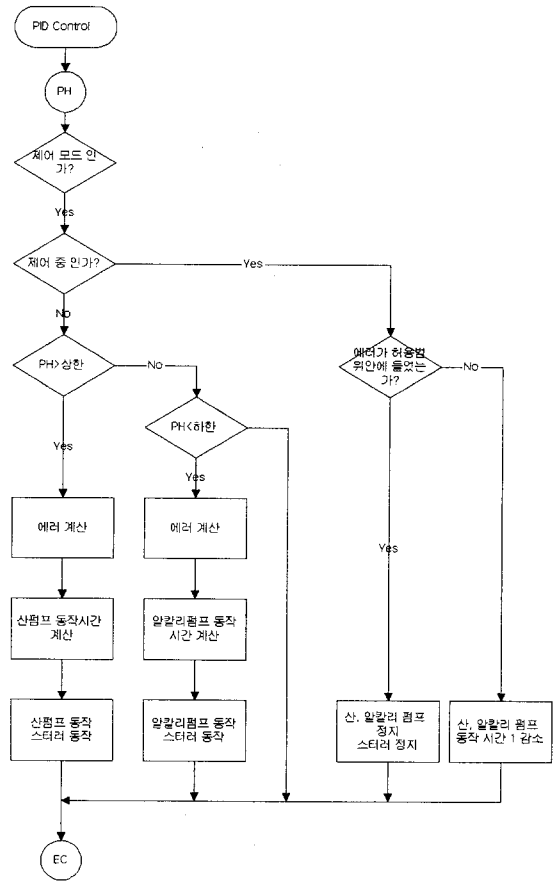
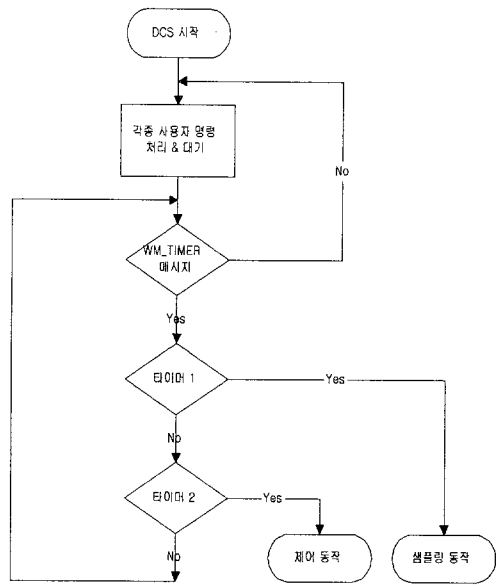
$$u_{k+1} = u_k + \Delta u_{k+1} = u_k + K \Delta U_{k+1}$$

$$\Delta U_{k+1} = F\{E_k, \Delta E_k\} = F\{K_p e_k, K_p \Delta e_k\}$$

여기서, F 는 퍼지 규칙에 따라 동작하는 퍼지 함수를 의미한다.

3) 배양액 제어 S/W의 구현

퍼지 제어기 설계에 의한 배양액 제어 소프트웨어의 흐름도는 다음과 같다.



가) 실제 재배에 의한 규칙 적용 및 개선

본 실험은 pH 자동조절장치에 생리적 산, 알칼리 비료를 이용함으로써 화학적 인 산, 알칼리 용액을 이용한 pH 자동제어와 비교하여, pH의 안정을 유지하며 생장과 품질이 우수한 작물을 생산하고자 수행되었다.

전반적으로 H_2SO_4 처리와 $NH_4H_2PO_4$ - $NaNO_3$ 처리로 pH를 5.5-6.5의 수준으로 조절할 수 있었다. pH를 H_2SO_4 으로 조절한 처리구에서는 큰 폭으로 떨어지는 변화 없이 5.5-6.5 사이의 값을 유지하여, H_2SO_4 를 이용하는 것은 상당히 안정적인 것으로 나타났다. $NH_4H_2PO_4$ - $NaNO_3$ 로 조절한 처리구의 경우는 H_2SO_4 보다는 빨리 나타났지만 희석하기 전처럼 급격하게 pH가 설정해준 범위 이상을 벗어나지는 않았다(그림 5-10). 그러나 $NH_4H_2PO_4$, $NaNO_3$ 로 조절하는 것 보다는 H_2SO_4 으로 조절하는 것이 급격히 떨어지지도 않고 설정해준 범위내에서 안정적으로 pH를 조절할 수 있는 것으로 나타났다.

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 6.0으로 맞춰준 처리구의 경우 비료와 섞어 베드에 넣어주었을 때는 맞춰준 pH가 식물체와 반응하여 6.0의 수준을 유지하지 못하고 계속적으로 높아지는 경향을 보였다(그림 5-10). 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 않았으나, 두 처리간에 큰 차이는 없었다.

배양액을 분석한 결과, 질소원과 황산을 이용하여 pH를 조절한 처리구에서 다른 처리구들과 비교하여 Ca를 제외하고는 이온의 양이 월등히 많았다(그림 5-11).

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4\text{-NaNO}_3$ 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 추정된다(Boon과 Steenhuizen, 1986). K의 잔존량이 많은 것도 NH_4 와의 길항작용으로 생각된다. 전반적으로 H_2SO_4 처리구에서 양분잔존량이 가장 많았는데, NO_3 의 경우는 SO_4 과의 길항작용일 수 있으나, 자세한 원인은 추후 연구되어야 할 것으로 생각된다.

수확 후, 상품성을 비교하기 위해서 결구무게, 결구폭, 지상부중을 조사하였다(표 5-3). 결구무게는 질소원으로 처리한 것이 가장 무거웠으며, 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 용수로 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.

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 가진다(Gila와 Stanley, 1992). 또한, 수확전 엽중 nitrate 함량을 줄이기 위하여 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 대한 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 비율을 높이는 경우가 있는데(Andersen과 Nielsen, 1992; Boon과 Steenhuizen, 1986; Ikeda와 Osawa, 1981; 박 등, 1994), 이럴 때 특히 NH_4 를 함유하는 비료의 효과가 클 것으로 생각된다. 반대로, 생리적 알칼리로 쓰는 NaNO_3 의 경우는 상추가 NO_3 를 다량 섭취할 경우 질산염 축적의 원인이 될 수 있으므로 주의할 요한다(Boon 등, 1990; Tremblay와 Senecal, 1988). 그러나 일반적으로 배양액의 pH를 높이는 경우는 거의 발생하지 않으므로 실제 문제가 되지는 않을 것으로 생각된다. 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 있어(박과 김, 1993) 배양액의 pH만을 안정적으로 조절하는데는 적합한 것

으로 생각된다. 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 낮춤과 동시에 흡수되는 NO_3 의 양을 NH_4 로 대체함으로써 안정적으로 pH를 조절하며 질산염의 함량을 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

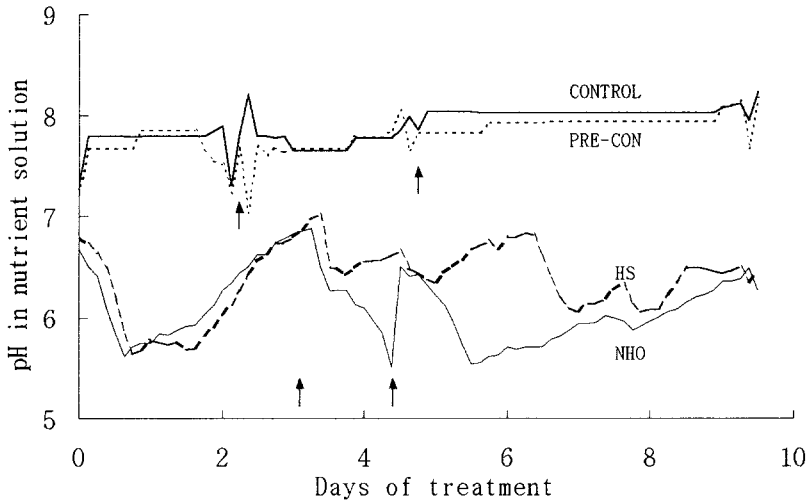


Fig. 5-10. Change of pH. The pH was controlled by $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ and NaNO_3 (NHO) or H_2SO_4 (HS). CONTROL: uncontrolled, PRE-CON: precontrolled to pH 6.0 before supply and uncontrolled during cultivation. Arrows show supply of nutrient solution.

Table 5-3. Fresh weight and head width of lettuce.

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

^z 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.

^y Mean separation within row by Tukey test, 5% level.

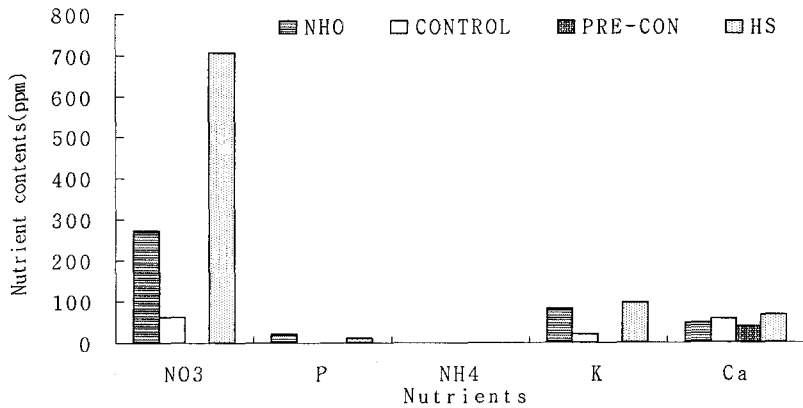


Fig. 5-11. Ionic contents in nutrient solution at harvest. CONTROL: uncontrolled, PRE-CON: precontrolled to pH 6.0 before supply and uncontrolled during cultivation. NHO: $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ and NaNO_3 , HS: controlled by H_2SO_4 .

3. 적요

센서의 수와 액추에이터의 수에 제한없이 장착할 수 있고 인터페이스 공간이 강력한, 새로운 형태의 유연한 하드웨어 시스템을 설계하였다. 순환여부에 관계없이 배양액을 자동으로 급배액할 수 있도록 장치를 고안하였다. 성장환경 및 배양액 인자 지식베이스 구축을 위해서 식별 단계, 지식 습득 단계, 설계 단계의 전문가 시스템의 개발 단계를 적용하였다. 또한 전체 시스템의 구성, 주 컴퓨터의 구성, 액 시스템의 구성, 전류-전압 변환 보드 구성 등을 통해서 배양액 자동공급 시스템을 구축하였다.

제 3 절 식물공장내 전문가 시스템 구축에 의한 배양액관리 시스템 개발

1. 재료 및 방법

가. 시스템의 reconfiguration

배양액 관리 시스템에 필요한 interface, 계측장치, actuator 등을 개선 혹은 첨가하였다.

1) interface

* A/D 변환기

규격	AX5412
채널용량	32 채널 단일 종단 입력
변환 속도	33회/초
입력범위	a. $-5V_{dc} < V_{in} < +5V_{dc}$ b. $4mA < I_{in} < 20 mA$
I/O 어드레스	4h의 단위로 200h와 3FFh의 범위에서 포트 어드레스 선택
인가전원	+5V DC, +12V DC, -12V DC
측정범위	0-5V

* DIO 보드

규격	AX5214
입출력 선의 수	48
동작 모드	8255모드 0
인터럽트 방법	점퍼선에 의한 선택, 레벨 2, 3, 4, 5, 6 or 7
잡음 여유도	$V_{T+} - V_{T-} = 0.4(TYP.)$
입/출력 레벨	TTL/DTL
데이터 선	8비트
인가전원	+5 Vdc 1.6A(Max.)
동작온도	0 ~ 60°C

* input panel

General purpose & CJC panel : AX750

* output panel

24 channel relay actuator panel : AX756

2) 배양액 조절 장치

	용수펌프	배양액 공급 펌프	비료, 산, 알칼리펌프
제품명	LG 화학용 펌프	한일 수중 펌프	LG 화학용 펌프
모델명	PM-250-PM	IP-215-D	PM-015NM
제작회사	LG 전자	한일 전기	LG 전자
전압(W)	220	220	220
소비전력(W)	340		35
양수량(ℓ/min)	75(온양정 5m)		7(온양정 4m)
최대유량(ℓ/min)	110	110	19

3) 계측장치

계측장치중 pH, EC값을 별도의 transmitter로 계측하였으나, 전원 및 회선이 복잡한 결점이 있어 이들을 통합한 transmitter로 개선하였다. 이로 인하여 전원이 7, 12, 20, 24V 이던 것이 12, 24V로 단순화되었으며, input signal선도 3가닥으로 줄어 신호선의 단순화도 이루어졌다. 이로 인해 시스템의 안정성, noise 감소, 작업의 편리성 등이 획득되었다.

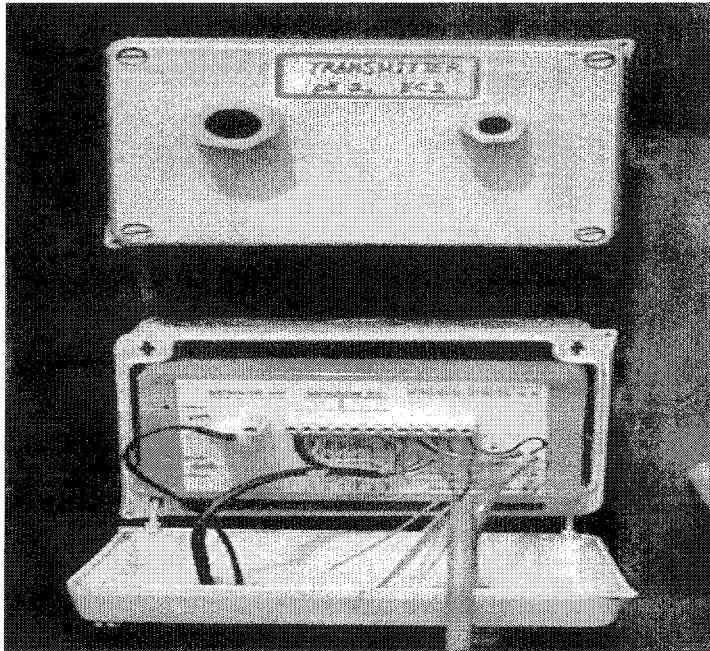


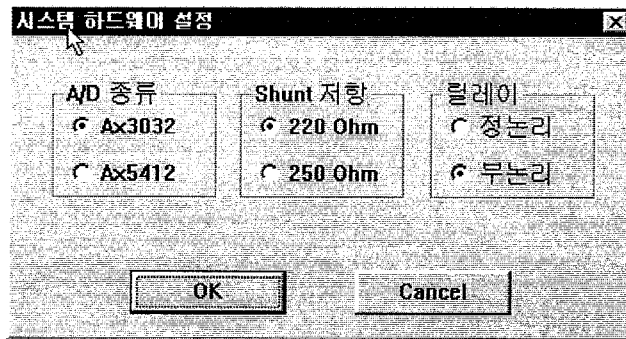
Fig. 5-12. Transmitter for pH and EC

나. 통합관리 software 구성

객체지향 제어 프로그램을 구축하기 위하여 다음의 각 부분들을 개발하였다.

1) 인터페이스 선정 화면 신설

제어에 사용하는 인터페이스의 종류는 다양할 뿐만 아니라 변화속도가 빠르는데, software에서 이를 고려하지 않으면 사용하던 인터페이스가 단종되거나 변경해야 하는 경우 software 자체를 수정하지 않으면 안 된다. 이러한 경우 쉽게 인터페이스를 변화시킬 수 있도록 인터페이스의 종류를 선택할 수 있는 화면을 첨가하였다. 이 단계에서는 A/D converter, C/V circuit, relay board의 특성을 선택할 수 있다.



2) 관리 software 개발

- ◇ logo graphic 화면 및 main graphic 화면의 구현
- ◇ main graphic 화면을 component 방식으로 구성함으로써 한 화면에서 내부 graphic file을 독립운영.
- ◇ 센서별 팝업 메뉴와 폴다운 메뉴를 가진 이중 구조 GUI의 개발
pop-up menu 선택시 그 내용에 맞는 animation display를 구현함으로써 재배가들이 자연스럽게 software의 기능을 이해할 수 있도록 구현
- ◇ 센서 스케일링 소프트웨어의 개발
- ◇ 채널 설정 소프트웨어의 개발
- ◇ 하드웨어 상태 감시 윈도우의 개발
- ◇ 각 출력 장치별 제어 소프트웨어 개발
- ◇ 양액 재배에 필요한 독립적인 제어 시스템의 개발
- ◇ 경보 소프트웨어의 개발
control software의 문제발생시 그 동안의 내용을 저장하고 경보 시스템이 동작하도록 monitoring program을 설계
- ◇ 도움말 시스템의 개발
도움말 기능을 재배가들이 쉽게 사용할 수 있도록 용어에서부터 access 구조에 이르기까지 설계

3) 실제 재배에 의한 동적 자동제어 시스템 적용 및 개선

개발된 시스템을 실제 재배에 시험 운영한 결과, 여러 가지 개선해야 할 사항이 도출되어 이를 개선하였다.

◇ 배양액 공급 장치에 바이패스 첨가

개발된 시스템을 시험 운영한 결과, 기존의 자동공급장치들이 갖고 있는 단점이 나타나서 이를 보완하였다. 즉, 기존의 장치들은 배양액 공급 신호가 주어졌을 때 공급 관에 있는 배양액이 그대로 공급됨으로써 크지는 않으나 공급초기에 원하는 배양액 조성과는 다른 상태로 공급이 되었다. 이러한 현상은 대규모 농가에서 동일한 조성으로 배양액을 공급하는 경우에는 문제가 되지 않으나 엄밀하게 배양액을 제어해야 하는 연구용이나 시험용에서는 제한인자가 된다. 이는 software의 개선만으로는 해결되지 않으며 장치의 보완이 필요한데, 본 시스템은 이를 보완하기 위한 방안으로 최초의 일정시간동안 공급량을 폐기하는 방법과 공급 관에 별도의 바이패스를 첨가하는 방법을 시험하였다. 그 결과, 바이패스를 이용하는 것이 시스템 점검(계측장비의 정상동작 감시)이나 배양액 절감에 좋을 것으로 판단되어 바이패스를 설정하고, 제어프로그램에서 설정시간만큼 원하는 밸브를 바이패스로 지정하여, 베드로 공급되는 배양액은 원하는 조성이나 농도로 유입되도록 개선하였다.

◇ 부하에 신호등 및 개별 스위치 첨가

계측 및 제어기의 작동상태는 프로그램 상에서 알 수 있는 것이 일반적이지만 이러한 경우 항상 프로그램에 주의를 기울여야 하며, 시스템 점검이나 약간의 수동작을 원할 경우 사용상에 불편이 제기되었다. 이를 보완하기 위하여 펌프 등의 부하에 신호등을 설치하여 작동상태를 쉽게 판단할 수 있게 하였다. 또한, 정보장치를 가동시킬 경우, 점검을 위하여 부하나 계측장치를 단락 시켜야 할 때에 불편함이 있는데 신호등에 의하여 이러한 불편을 해소할 수 있었다.

전원이나 프로그램의 이상시 부하를 강제작동시키기 위한 수동 스위치를 첨가하였다. 첨가부위는 각종 펌프류, 공급관 전자변 등이다.

다. 배양액 관리 시스템에 의한 상추품질향상 실험

1) 재료 및 방법

본 관리시스템의 기능 중에서 배양액 온도 관리를 상추생산에 적용시켜 품질을 높이고자 본 실험을 수행하였다.

본 실험은 1998년 3월 6일부터 1998년 4월 29일까지 상명대학교 원예과학과 수경재배전용 유리온실에서 수행하였다. 공시작물은 잎상추(*Lactuca sativa* L.)인 ‘뚝섬 적축면’(농우종묘)을 사용하였다. 98년 3월 6일에 폴리우레탄 스폰지(2.2×2.2×2.2cm)에 2mm 깊이로 1립씩 파종하였으며, 3월 27일에 실험베드로 정식한 후 배양액을 Yamazaki 1/2농도로 공급한 후 순환시켰다. 4월 3일에 표준 배양액으로 공급해주었다. 실험베드는 스티로폼제로, 가로 20cm, 세로 240cm, 높이 10cm였으며, 재식거리는 20cm로 하였다. 재배방식은 담액수경이었다. 처리 전에는 시간당 15분동안 배양액을 공급하였으며, 처리기간 중에는 연속급액하였다.

실험처리는 근권온도를 25℃, 20℃, 15℃, 10℃로 설정하였다. 온도를 일정하게 유지하기 위해서 온도 센서를 연결하여 제어해 주었다(그림 1). 제어범위는 ±0.5℃로 하였다. 계측 및 제어는 본 연구실에서 자체 개발한 시스템 및 프로그램을 이용하였다. 대기 및 배양액 온도 측정은 하루 중 오전 10시에 계측된 data로 하였다. 생체중은 파종 5일 후부터 5일 간격으로 지상부를 측정하였다.

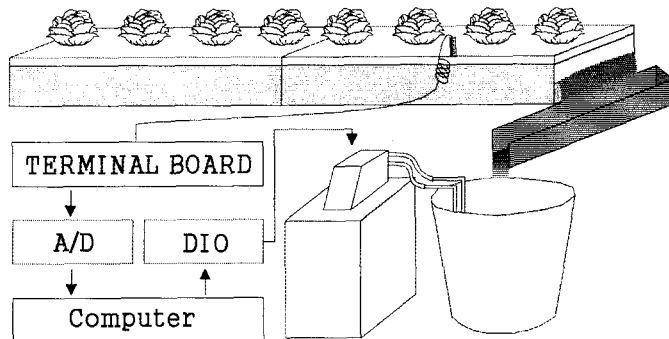


Fig. 5-13. The nutrient solution monitoring-control system

안토시아닌 분석을 위해서 7번째 성숙한 잎의 끝부분에서 4cm 되는 부분까지를 채취한 후 그 sample을 100mL HCl로 추출하고, 암조건에서 48시간 동안 배양용액에 3°C에서 진탕한 다음, spectrophotometer(Shimazu, UV-160A)를 이용하여 530nm에서 측정하였다. 시료는 처리당 4반복이었다.

2) 결과 및 고찰

근권온도가 낮을수록 anthocyanin 함량이 증가하고 nitrate 함량은 감소하였다 (표 5-4). 그러나 생장은 저조하였다(그림 5-14). 상대생장속도가 고온일수록 일찍 최대값에 도달하여 생장이 온도에 의존함을 증명하고 있다(그림 5-15). 일반적으로 생장율은 기온이 높을수록 높아지는 경향을 보이는 반면, 배양액 온도의 효과는 기온과 관련하여 다르게 나타난다. 즉, 배양액 온도가 높으면 생장율이 증가한다는 보고(Boon 등, 1988)도 있으나, 근권온도가 높으면 품질이나 수확량에는 영향이 없으나 nitrate 함량이 증가한다는 보고(Malorgio 등, 1995)도 있어 기온을 고려한 고찰이 필요하다.

근권온도와 nitrate 함량과의 관계에서는, 근권온도가 낮고 광도가 높을 때 nitrate 함량이 더 낮은 경향을 나타내며(Malorgio 등, 1995; Voipio와 Autio, 1995) 이는 본 실험과 동일하다. nitrate 함량은 품종간 차이가 있는데 청측면보다 적측면의 nitrate 함량이 더 높은 경우가 보고된 바 있어 이에 대한 향후 연구가 필요하다.

Table 5-4. Anthocyanin content of lettuce according to root temperatures

Root Temperature (°C)	Number of leaves	Absorbance at 530nm	Nitrate mg/kg
	mean ± SE	mean ± SE	mean ± SE
25	17.6 ± 0.4	0.221 ± 0.020	1129 ± 22
20	17.2 ± 0.2	0.330 ± 0.030	965 ± 14
15	15.1 ± 0.4	0.567 ± 0.025	554 ± 28
10	14.8 ± 0.1	0.743 ± 0.069	312 ± 27

* numbers per each treatment : 4

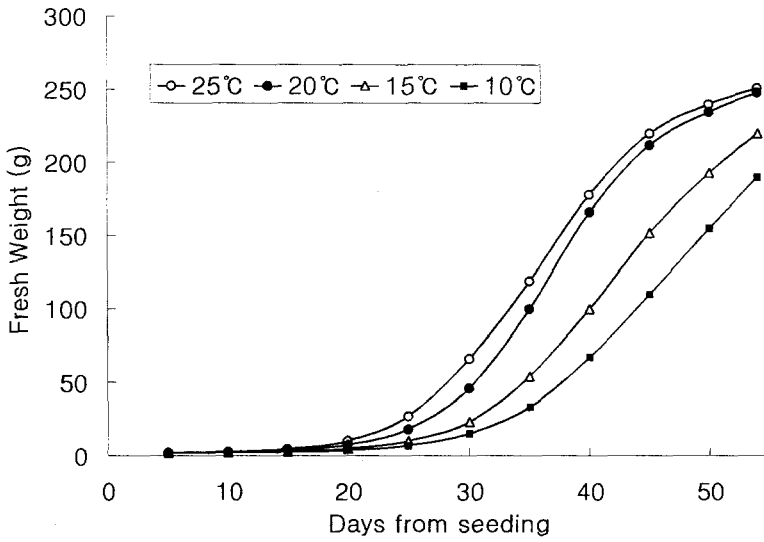


Fig. 5-14. Effects of root temperature on the growth

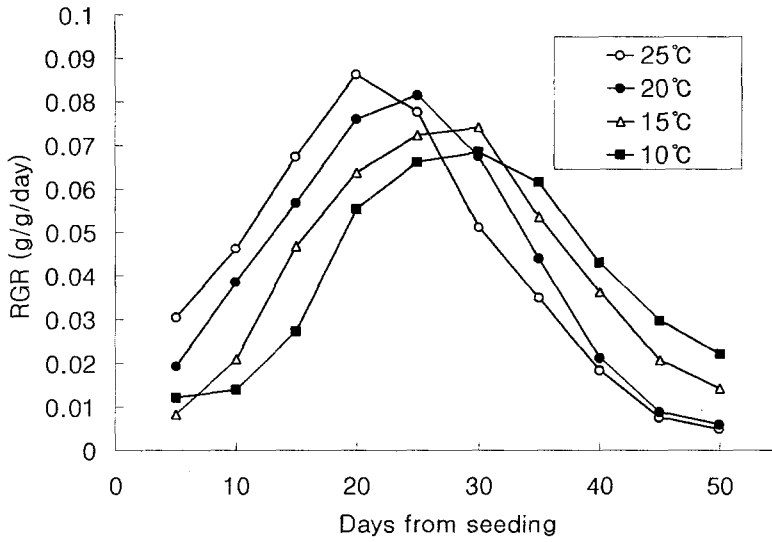


Fig. 5-15 Effects of root temperature on RGR

본 실험에서는 배양액 관리 시스템에 의하여 배양액의 온도가 제어됨을 확인할 수 있었으나, 계측치와 설정치간의 편차가 기온의 영향을 받음으로써(그림 5-14)

재배시스템에서의 온도 전달 체제에 대하여는 향후 더욱 개선이 필요한 것으로 생각된다.

3. 적요

계측과 제어 인자간의 퍼지 관계의 규칙을 구축하기 위해서 Fuzzy 추론으로 정확한 출력을 발생시키는 실시간 처리가능 시스템을 설계하였다. FIES의 추론 및 지식베이스 설계전문가시스템에 의한 생육제어 프로그램을 구축하여 동적 환경제어시스템과의 interface program을 설계하고 배양액 제어에 지능제어 algorithm을 도입하여 설계하였다. 모델 없이 비선형성이 강한 제어대상 시스템에 적절한 퍼지 PID 제어방법으로 그 동안의 문제를 완전히 극복한 적절한 배양액 조성 제어 프로그램을 구현하였다. 실제 재배에서 pH 자동제어 실험을 통해 pH의 안정을 유지하며 생장과 품질이 우수한 작물을 생산하였다.

제 4 절 환경보존형 배양액관리 체계 구축

1. 재료 및 방법

ACSMT(Automatic Control System for Multi-Tanks of Nutrient Solution)을 개발하기 위한 하드웨어는 크게 개인용 컴퓨터, 센서장비, 인터페이스 카드 그리고 멀티 포트로 나누어서 설계하였다. 개인용 컴퓨터에 인터페이스 카드를 장착해 센서장비로부터 데이터를 받는다. 또한 직렬포트를 사용해서 받기도 한다. 센서장비로부터 오는 신호를 디지털 데이터로 바꾸기 위해서 인터페이스 카드를 사용했다. 인터페이스 카드는 AD변환기와 DA변환기를 가지고 있는 카드와 디지털 입출력 신호를 위한 카드로 나누어진다. 대부분의 센서는 인터페이스로 입력을 받게 된다. 무게를 측정하는 센서는 직렬포트로 데이터를 받기 때문에 직렬포트의 개수에 제한을 받게 된다. 따라서 이 문제는 멀티포트를 사용하도록 설계하였다.

가. ACSMT의 소프트웨어 설계 및 개발

ACSMT(Automatic Control System for Multi Tanks of Nutrient Solution)의 소프트웨어는 Windows 환경에서 Visual C++5.0을 개발 툴(Tool)로 사용하였다.

프로그램의 속도와 개발 기간을 단축하고 실제 시설 내에서 엽채류를 재배하는 사용자가 반드시 필요한 기능만을 간편하게 사용할 수 있도록 최적의 GUI기법을 사용하였다. Button형 등의 팝업(Pop-up) 메뉴는 간편한 풀다운(Pull-down) 메뉴만으로 대체하였다.

나. ACSMT 하드웨어 개발

배양액 제어의 기본 구조를 두 가지 모듈로 나누어 하드웨어를 개발하였다. 사용한 모든 하드웨어는 IBM PC의 ISA-BUS를 이용하여 인터페이스 되어 있으며,

센서 피드백을 위하여 18채널을 갖는 고속의 사용보드형 A/D 변환기를 사용하였으며, 펌프로 출력되는 제어출력 신호를 위한 32채널 디지털 입출력이 역시 인터페이스 되어 있다.

다. 비례환(Feedforward) 계획 제어 시스템의 완성

사용자가 임의로 자동 제어의 값과는 상관없이 오로지 사용자의 정의대로 값을 주는 비례환 계획 제어 시스템을 구축하였다.

라. 환경과 배양액 종합 관리 시스템 운영

4개의 배양액 공급장치로 구성된 ACSMT를 구축하였다. 각 배양액 공급장치는 재배베드, 배양액 공급 펌프, 탱크, 산알칼리 펌프, 농축 배양액 펌프, 액온센서, pH센서, EC센서, 지연 timer, magnet, transmeter 등으로 구성하였다.

각 설정값을 4가지로 정한 후, 근온, pH, EC를 측정, 제어하여 ACSMTsystem의 성능을 분석하였다.

2. 결과 및 고찰

가. 환경보존형 배양액 관리 체계 구축

기존에 상용화된 배양액 제어 시스템은 실질적으로 하나의 배양액 탱크만을 자동 제어하였다. 엽채류 생산의 경우 실제로 한 농가가 여러 작물을 재배하는 경우가 많은데, 배양액관리 시스템은 고가이기 때문에 한 개의 시스템으로 모든 작물을 생산하고 있다. 이로 인하여 재배작물 혹은 같은 작물이라도 생육단계에 적합한 배양액을 공급할 수 없어 최적의 성장을 기대할 수 없었으며 배양액의 손실이 존재하였다. 그런 문제들을 해결하기 위해서 여러 개의 배양액 조성을 한 개의 시

시스템으로 관리할 수 있는 시스템을 개발하였으며, 이를 ACSMT(Automatic Control System for Multi-Tanks of Nutrient Solution)라 명명하였다. 본 시스템은 생산현장뿐만 아니라 엄밀한 제어를 필요로 하는 연구에서도 탁월한 기능을 발휘할 것으로 생각된다.

1) 전체 시스템 구성

가) 하드웨어 구조

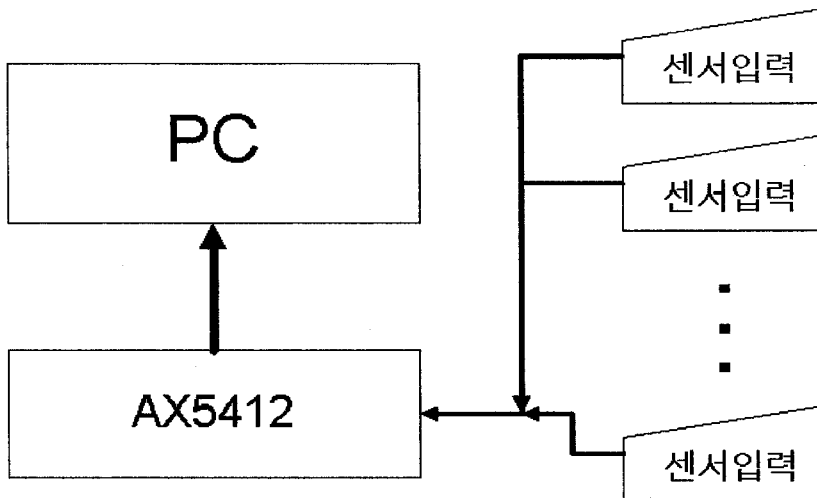


Fig. 5-16 Hardware structure for monitoring

그림 5-16은 AD변환기와 DA변환기를 내장한 AX5412와 관련 하드웨어의 구성도이다. 이 인터페이스 카드는 각 센서(EC, pH, 온도)의 출력 단자가 보드의 터미널을 통해 보드와 직접 연결이 되도록 설계하였다. 센서의 출력은 전압으로 출력하는 것과 전류로 출력하는 것이 있는데 전압으로 출력을 하면 터미널에 바로 연결을 하고 전류로 출력을 하면 출력 양단에 션트 저항(shunt resistance)을 연결하여 전류를 전압으로 바꾸어 연결을 한다. 전류로 출력을 하는 센서장비는 보통 4mA에서 20mA로 출력을 한다. 이렇게 들어온 센서 출력은 카드 내의 AD변환기

의 각 채널에 연결되어 정해진 샘플링 시간에 맞추어 디지털 데이터로 바뀌어진다. 인터페이스 카드의 하드웨어 초기화는 운영체제가 사용하지 않는 빈 I/O번지를 찾아 스위치를 세팅을 하면 된다. 빈 번지를 찾아 세팅을 하는 것은 DIO보드도 같은 방법으로 한다. AX5412에서 만들어진 데이터를 비교해 펌프 등을 가동할 것인지 아닌지를 판단한다. 펌프를 가동하는 것은 DIO보드에서 한다. DIO보드도 터미널에 연결하여 사용을 한다. DIO보드는 터미널로 5V 신호를 내보낸다. 이 5V 신호를 ULN2003으로 증폭을 하여 릴레이를 동작하게된다. 릴레이는 5V 보다 큰 전압을 사용하기 위해서 터미널에 장착이 되어있다. 다음은 DIO보드의 연결을 간략하게 표현한 것이다.

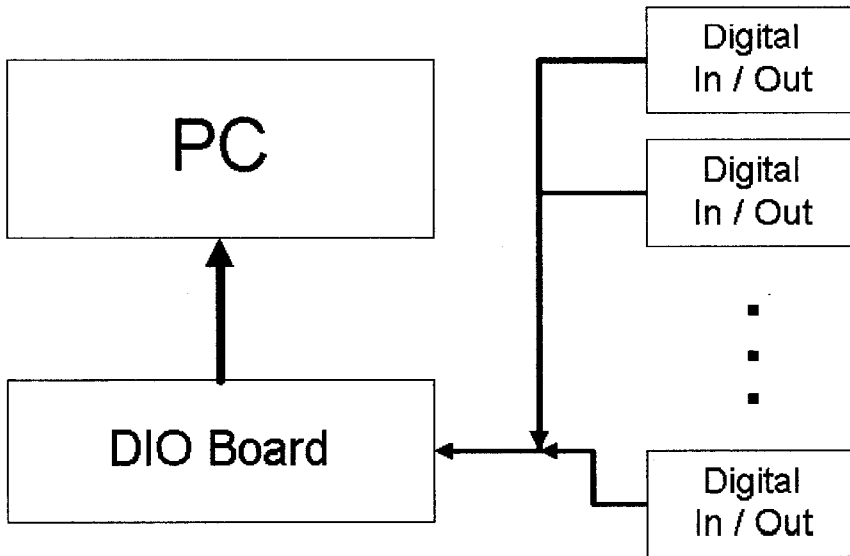


Fig. 5-17 Hardware structure for actuator working

그림 5-17에서 볼 수 있듯이 인터페이스 카드로 제어를 위한 하드웨어적인 시스템이 완성이 된다. 다음은 직렬포트를 사용해 무게 센서에서 데이터를 가져오는 방법이다. 무게 센서는 제어를 위해 사용되는 것이 아니기 때문에 단지 PC에서는 받기만 하면 된다. 무게에 대한 데이터를 얻기 위해서 쓰이는 것이다. 그림 5-18은 무게센서들과 PC의 직렬포트를 연결을 해주는 방법이다.

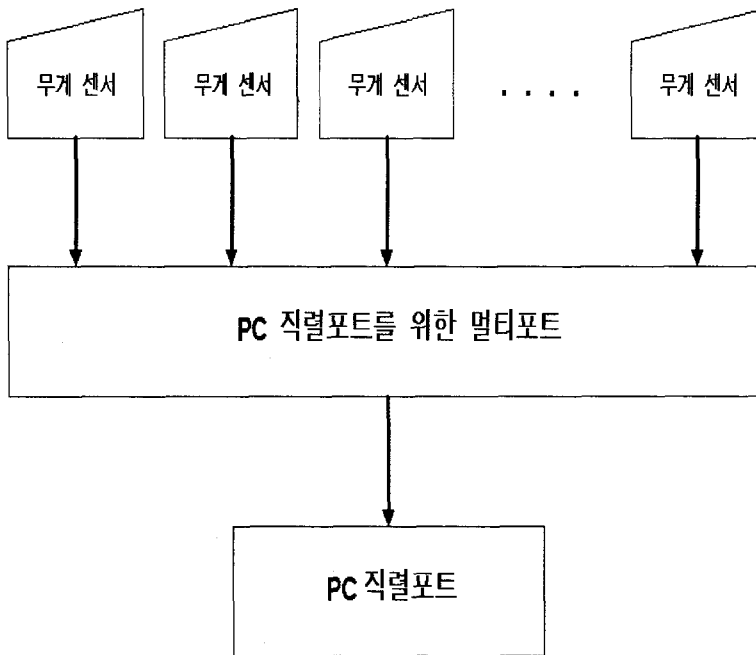


Fig. 5-18 Hardware structure for weight sensing

복수 배양액 탱크를 지원하는 자동 제어 시스템의 전체 구조는 그림 5-19와 같다.

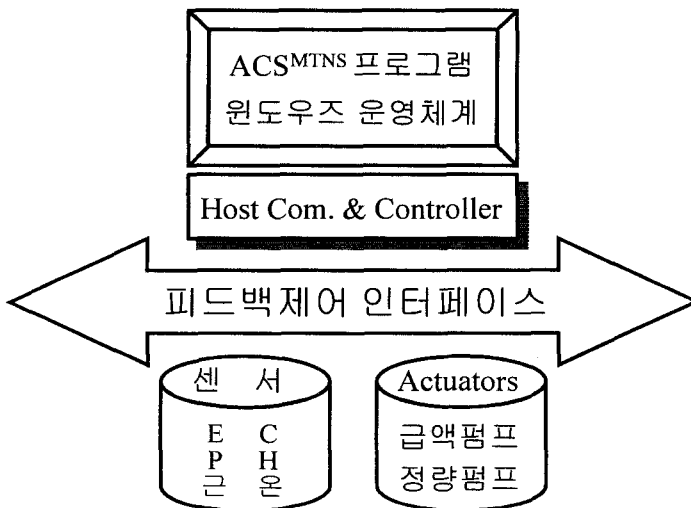


Fig. 5-19 Overall system structure

당해연도 연구에서 개발한 ACSMT에서 탱크별 센서들은 EC와 pH 그리고 근온센서로, 배양액의 적절한 조성을 위하여 기본적으로 필요한 센서들을 PC 인터페이스 기술을 이용하여 고속 A/D 변환기를 통하여 정확하게 자동제어 프로그램과 연결하며, 그것을 제어기를 거쳐 배양액의 적절한 조성을 위한 액츄에이터인 정량펌프와 베드에 적절하게 조성된 배양액을 적절한 양으로 적절한 시간에 공급하는 급액 펌프를 제어하기 위하여 제어 프로그램과 디지털 입출력 보드를 이용하여 인터페이스 하였다. 배양액 탱크의 수를 4개에서 8개까지로 증가시켜 설계하였으며, 탱크별로 독립 제어하면서 탱크별 순서제어(Sequence Control)가 가능한 첨단 제어기술을 적용한 시스템이면서 또한 사용이 간편한 대중형 배양액 제어 시스템이다.

나) 소프트웨어 구조

소프트웨어는 하드웨어를 조작을 하고 이 하드웨어로부터 데이터를 주고받으며 제어 이론을 사용해 사용자가 의도한 대로 작동을 한다. PC의 대부분이 윈도우즈를 기반으로 구축이 되어 있으므로 소프트웨어 역시 윈도우즈를 기반으로 되어있다. 소프트웨어의 대부분이 메뉴에서 시작하도록 설계하였다. 메뉴에서 설정할 부분을 설정하고 또 명령 또는 선택을 한다. 그림 5-20은 소프트웨어의 메뉴를 흐름도로 나타내었다.

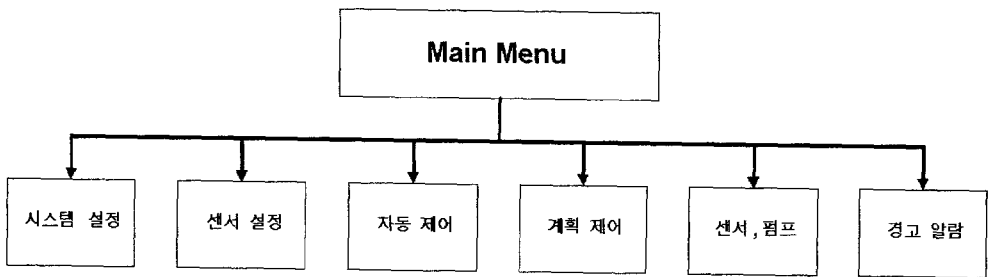


Fig. 5-20 Overall structure of ACSMT software

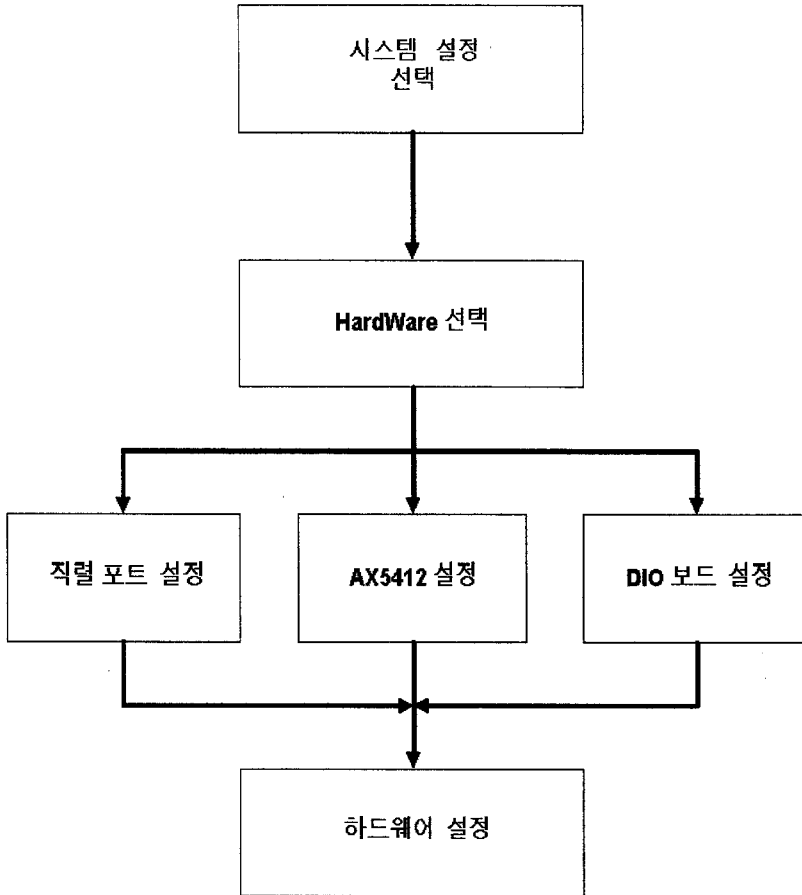


Fig. 5-21 Set points of ACSMT system

메인 메뉴를 보면 시스템 설정, 센서 설정, 자동제어, 계획제어, 센서 및 펌프 그리고 경고 알람 순으로 되어있다. 시스템 설정은 하드웨어적인 설정 값을 프로그램에 맞게 소프트웨어 적으로 설정을 하는 곳이다. 그림 5-21은 시스템 설정에 대한 부분을 나타내었다. 시스템 설정을 선택하면 선택을 할 수 있는 창이 생성이 된다. 이 창에서 어떤 하드웨어를 세팅을 할 것인가를 보고 각 사용하고 있는 하드웨어를 PC에 맞게 라디오 버튼에 표시를 하면 된다. 이렇게 세팅이 되면 이 값은 프로그램에서 private 라는 변수 그룹에서 받아 프로그램이 멈출 때까지 사용을 하게된다. 다음은 프로그램의 헤더 파일에서 정의한 부분의 일부 명령어 구조인데 프로그램에서 사용할 부분의 것을 시스템 설정에서 초기화하여 설계하였다.

private:

int nBaseAddr;

int nBaudRate, SerPort;

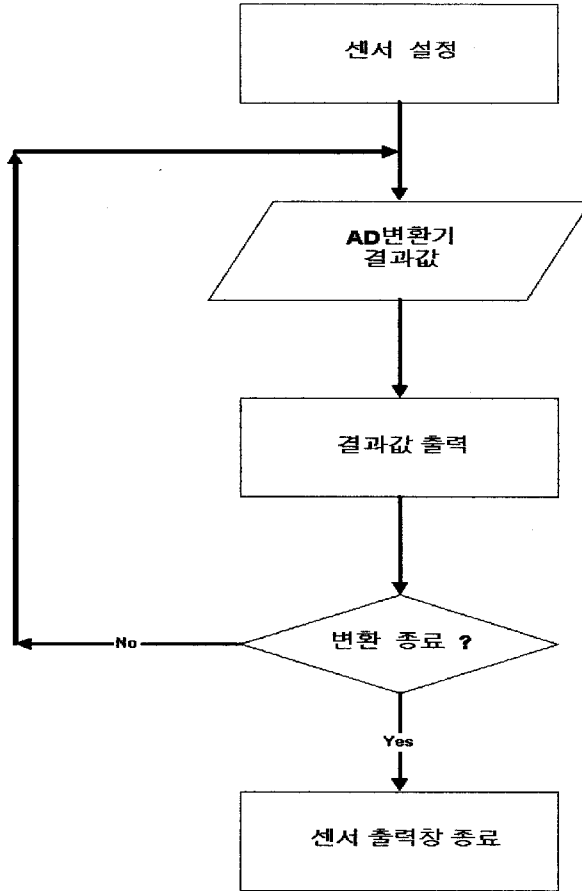


Fig. 5-22 Set-up of ACSMT sensors

다음 기능에는 센서 설정이 있다. 이 센서설정은 센서 사용상 좀더 빠르고 편하게 하기 위해서 만들어진 부분이다. 그림 5-22에서는 센서설정에 관한 부분을 나타내었다.

센서 설정을 선택하면 윈도우 창이 생성된다. 이 생성된 창에 각 센서에 대한 결과 값이 표시가 된다. 흐름도를 보면 변환 종료에서 조건문이 있는 것을 볼 수 있다. 창이 생성이 되어있으면 센서에서 읽어져 현재 변환기를 거쳐 들어오는 센서

값이 계속해서 표시가 된다. 이러한 기능은 현재 값이 어떻게 들어오는 지를 보고 싶을 때 사용이 될 수 있고, 가장 중요한 것은 센서의 영점 조정을 할 때 사용하기 위해서 이다. 영점이 잡히지 않은 센서의 값은 정확한 값을 얻기 힘들기 때문이고 센서 값이 선형적으로 출력이 나온다는 보장이 없기 때문에 영점은 정확해야 한다. 소프트웨어적인 영점 조정을 위해 함수를 제공한다. 다음은 소프트웨어적인 영점조정의 프로그램이다.

```
void SeekZeroPoint()
{
    int i, nBuff1[16], nBuff2[16];
    for (i=0 ; i < 16 ; i++)
    {
        nBuff1[i] = _AX5412(i);
        if (nBuff1[i] != 0)
            nBuff2[i] = -nBuff1[i];
        else    nBuff2[i] = 0;
        nZeroValue[i] = nBuff2[i];
    }
}
```

이 함수가 실행이 되면 nZeroValue[i]에 상대적인 영점 값이 만들어진다. 이러한 함수는 센서에서 영점 조정이 곤란할 때 사용하기 위해 만들었다. 프로그램이 실행이 된 후 이 메뉴를 선택해 영점을 조정하든지 센서 값만을 보던지 창이 활성화 되어있으면 계속해서 값을 출력을 한다.

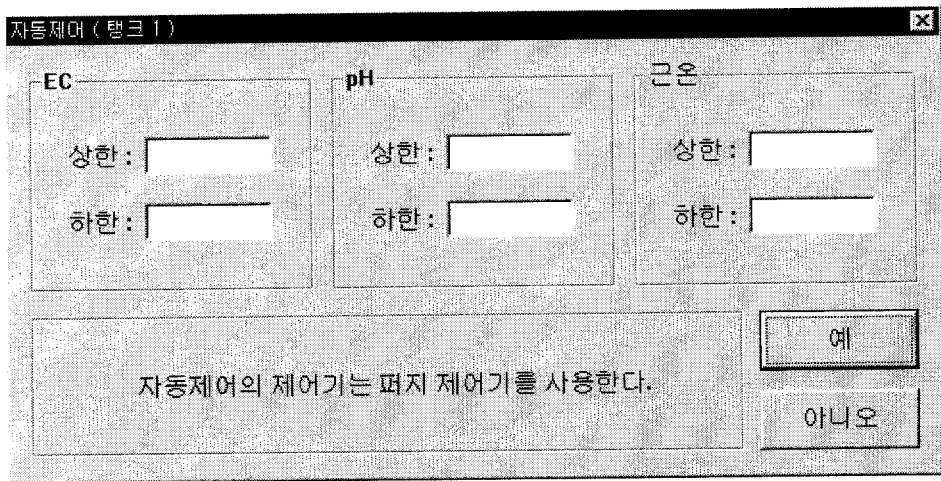


Fig. 5-23 Main window for automatic control

그림 5-23은 자동제어이다. 이 부분은 제어 이론이 함께 연동해서 프로그램이 수행된다. 이 소프트웨어에서 사용할 제어 이론은 퍼지(Fuzzy)알고리즘이다. 기존의 것은 PID제어 방법을 사용하였다.

그림 5-24는 탱크별 제어 구성도이다. 자동제어 창에서 상한 값과 하한 값 그리고 P, I, D의 각 계인 값을 에디터에 입력을 하였다. 퍼지는 이러한 계인 없이 상한과 하한 값만 넣어주면 된다. 이렇게 설정이 된 값은 제어기에 의해 펌프를 ON, OFF하며 원하는 결과를 준다.

자동제어를 선택을 하면 다시 8개의 탱크목록이 나온다. 거기서 원하는 탱크를 선택해서 값을 입력하면 된다. 다음 메뉴는 계획제어이다. 계획제어는 자동으로 값을 맞춰 주는 것이 아니고 사용자가 직접 펌프의 동작시간을 임의로 설정해 주는 것이다. 그 다음에 나오는 메뉴가 센서 및 펌프이다. 이 메뉴는 현재 센서와 펌프가 동작을 하고 있는가를 알기 위함이다. 모니터링에 대한 부분이기도 하다. 어떤 특정 값이 나오는 것이 아니고 단지 동작의 상태만을 표시 하여준다. 모든 펌프를 한눈에 볼 수가 있다. 프로그램 상에서는 펌프가 동작을 정말로 하고 있는지는 알 수가 없기 때문에 사용자는 각 펌프를 눈으로 확인을 할 수밖에 없다. 그러나 이런 메뉴는 농업 자동화에서 꼭 있어야할 부분이기도 하다. 그림 10에서는 센서 및 펌프 에 대한 메뉴를 나타내었다.

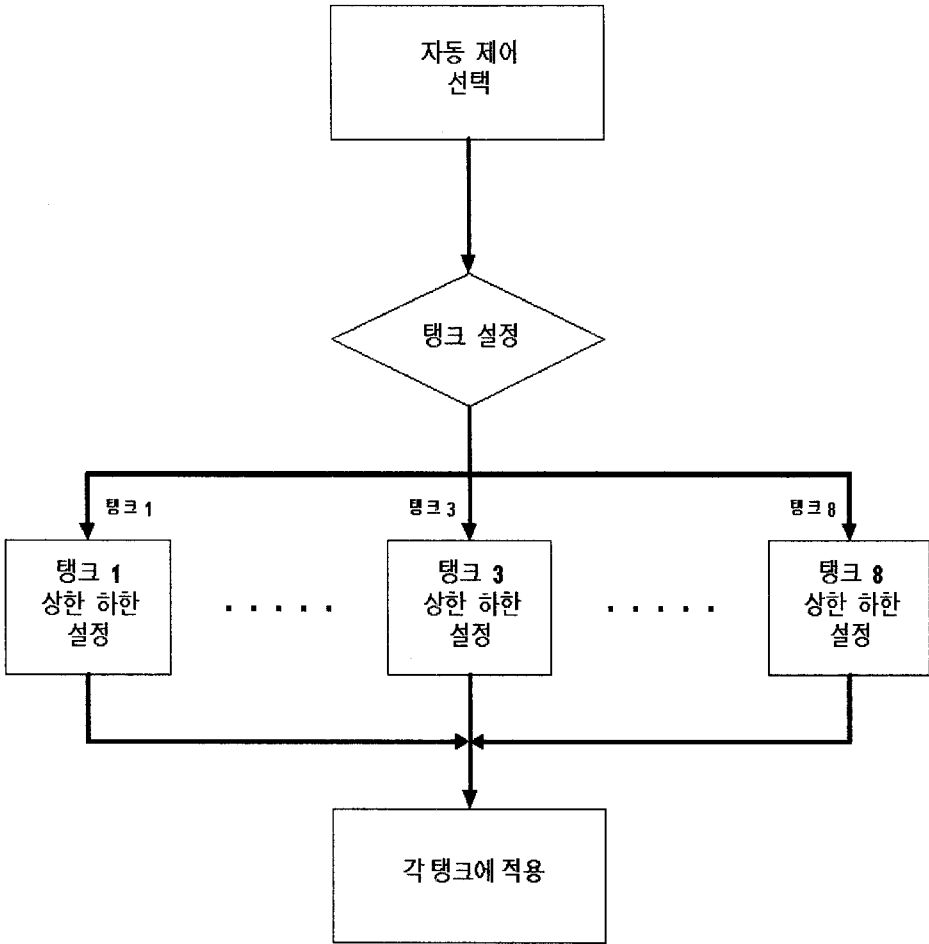


Fig. 5-24. Flow chart of control for each tank

이 부분도 센서 선택과 마찬가지로 창이 계속 활성화가 되어 있으면 계속 체크를 한다. 사용자는 프로그램이 실행되는 중에도 보아야 하기 때문에 계속 체크를 한다. 다음은 알람 경고 메뉴이다. 이 부분은 자동제어에서 상한 값 혹은 하한 값을 벗어날 경우 경고음이나 아니면 메시지 창을 띄워 사용자에게 현재 발생된 경고를 알리는 부분을 설정한다. 메시지 창은 어떤 경고인지를 표시하고 사용자가 클릭을 하지 않으면 계속해서 화면에 보여지게 된다. 일정 시간 후에도 클릭을 하지 않으면 프로그램에 의해 동작을 하도록 설계하였다.

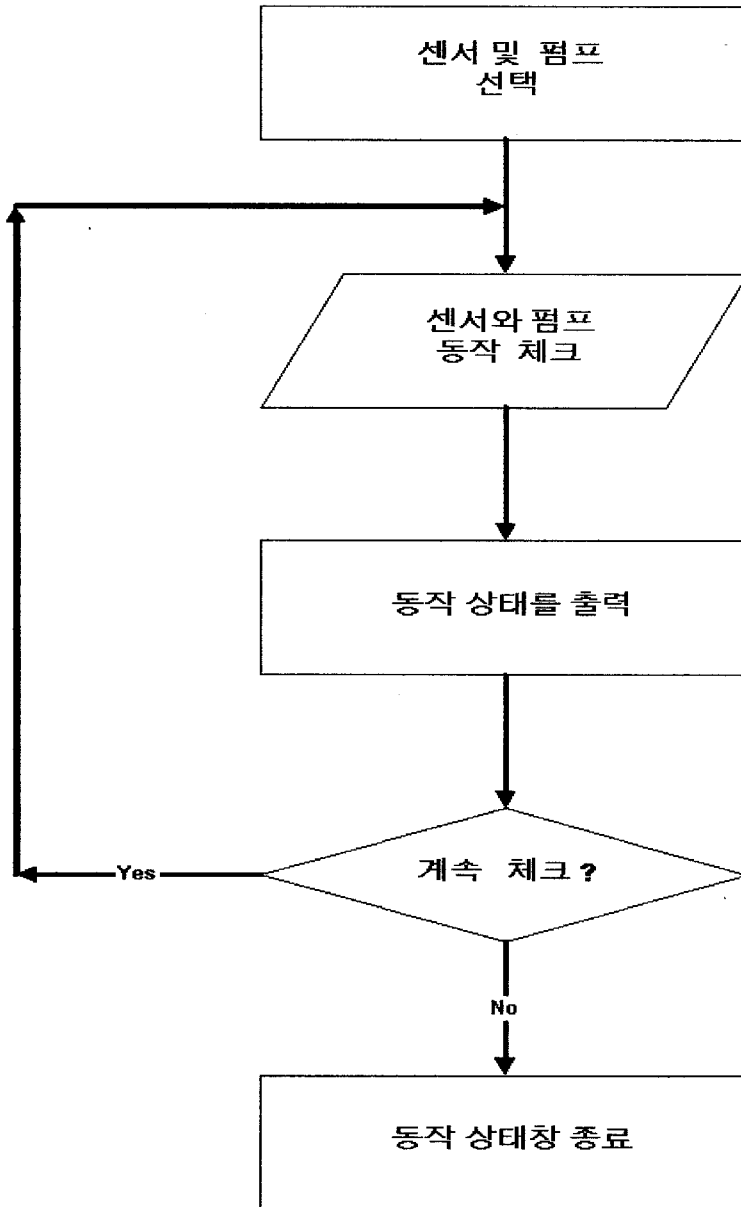


Fig. 5-25. Flow chart of sensors and related pumps

2) ACSMT 개발 방법

그 동안 하나의 호스트 컴퓨터에서는 단일 자동제어 소프트웨어를 이용하여 복수개의 배양액 탱크를 병렬로 통합 제어하는 것이 어려운 상황에 있었으나, Windows PC상에서 Visual C++ 프로그램 틀을 이용하여 복수개의 제어모듈을 제어하는 것이 가능해졌다. 그 것은 복수개의 타이머를 운영하는 기술과 탱크별 제어모듈을 실시간으로 스케줄링 하는 기술이다.

가) ACSMT에서 새로이 적용한 프로그램 방식 타이머

① OnTimer 함수 사용.

타이머란 일정한 시간 간격으로 WM_TIMER 이벤트를 소프트웨어적으로 발생시키는 메커니즘이라 할 수 있다. WM_TIMER 이벤트가 발생하는 시간 간격은 프로그래머가 정해줄 수 있다. 예를 들어, 타이머 세팅시 500밀리세컨드(0.5초)로 시간 간격을 정해주면 WM_TIMER 이벤트가 500밀리세컨드마다 발생되며, 이 이벤트에 연결된 코드도 같이 실행된다.

```
int iInstallResult;
iInstallResult = SetTimer(1, 500, NULL);
if( iInstallResult == 0 )
{
    MessageBox("cannot install timer !");
}
```

② SetTimer()함수 사용.

이 함수는 세 개의 파라미터를 가지고 있다. 처음 것은 타이머 ID로, 여기서 1로 정해주었다. 두 번째는 WM_TIMER 이벤트가 발생할 시간 간격으로, 여기서는 500밀리세컨드로 정해주었다. 세 번째 파라미터는 500밀리세컨드마다 실행될 함수의 주소이다. 여기서는 NULL로 해주었기 때문에, 아무런 함수도 연결되지 않았다. 'if'는 타이머가 세팅이 되었는지를 조사하는 구문이다. 일단 타이머가 설치된 후에는 KillTimer()함수를 실행해서 없앨 수 있다. 예를 들어, 프로그램의 종료시

점에서 타이머를 없애고 싶으면 다음과 같이 사용하면 된다.

ID가 1인 타이머 --> KillTimer(1);

생성시킨 타이머는 반드시 KillTimer()함수로 없애는 것이 프로그램의 안정성에 좋도록 설계하였다.

나) ACSMT에서 사용하는 제어모듈의 스케줄링 방법

이산 이벤트(Discrete Event) 방식에 의하여 소프트웨어적으로 각 탱크별 제어 모듈이 스케줄링 되는데, 각 상태 변수(State Variable)는 탱크가 되며, 입출력의 오차범위를 근거로 하여 천이 되어진다. 그 천이도(Transition Diagram)는 그림 5-26과 같다. 오차범위는 생장 시기나 광량의 현재 값 등에 의하여 다른 값을 가진다.

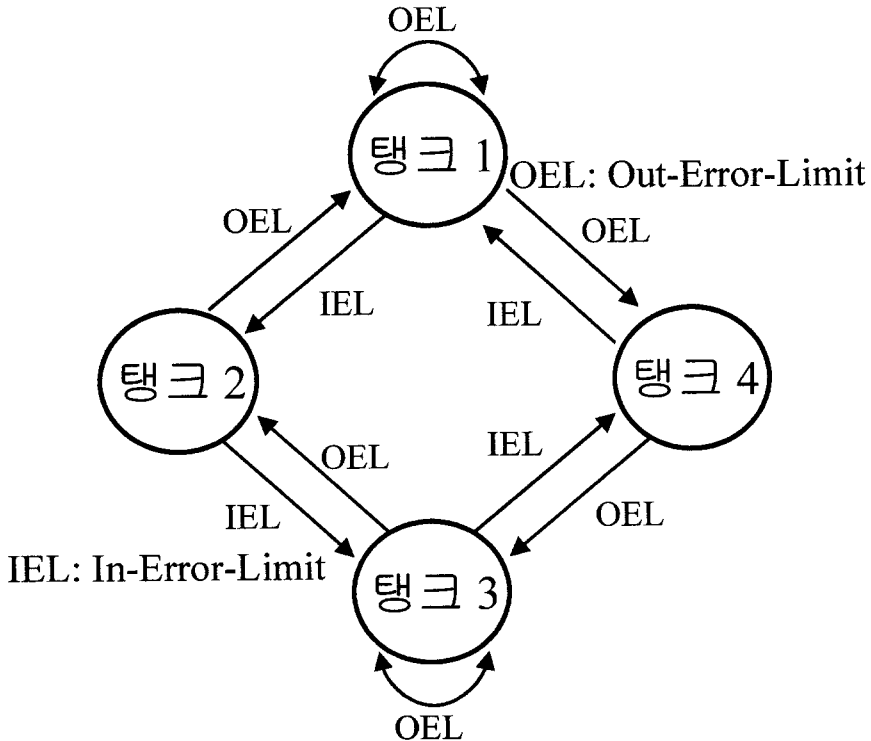


Fig. 5-26. Transition diagram of tank-control module

위의 입출력 천이 관계를 구현하는 프로그램의 Pseudo-Code는 아래에서 볼 수 있으며, 실제 구현에서는 Timer와 입출력 값을 함께 관측하여 천이관계를 결정한다.

```
int TankNum; float ERR = 0;
while ( TankControl == 1 )
{
    for (TankNum=1 ; TankNum < 5 ; TankNum++)
    {
        if ( TankInput[ TankNum ] <= ILimit[ TankNum ] )
        {
            if ( TankOutput[ TankNum ] <= OLimit[ TankNum ] )
            {
                ERR += ( OLimit[ TankNum ] - TankOutput[ TankNum ] );
                TankInput_Control( ERR );
            }
            ERR = 0;
            else OnControlAlarm();
        }
    }
}
```

나. ACSMT의 소프트웨어 설계 및 개발

ACSMT의 주 그래픽 사용자 인터페이스(Main GUI)는 그림 5-27와 같다.

대부분의 컴퓨터들은 윈도우즈를 운영체제로 채택하고 있다. 따라서 이런 컴퓨터에서 프로그램을 개발하는 일은 운영체제를 무시 할 수는 없는 것이다. 이번에 만든 프로그램은 Visual C++5.0으로 윈도우 환경 하에서 응용 프로그램을 개발 할 수 있고, 제어 측면에서도 다른 프로그램 보다 더 효율적으로 개발을 할 수 있다. 위 그림은 이번에 만들어진 프로그램의 초기화면이다. 시작 배경에 우리가 해야할 일을 부각시키기 위해 식물공장에 대한 그림을 실었다.



Fig. 5-27. Main graphic user interface

프로그램은 메뉴, 툴바, 그리고 상태 바와 비트맵으로 이루어져있다. 메뉴는 시스템 설정, 설정판, 주변기기 제어, 센서 조정, 온실 감지, 파일, 보기 그리고 도움말 이렇게 8개로 되어있다. 시스템 설정은 자동화에 필요한 여러 요소 (센서의 초기값, 기타 다른 기기의 초기값)들의 필요한 초기 치를 부여한다. 처음 가동시 시스템 전체의 안정된 출발을 할 수 있도록 한다. 설정판은 시간 설정, 배양액 설정, PC설정, 배양액 펌프 그리고 경고음 이렇게 6개로 되어있다. 시간 설정은 각각의 센서로부터 직렬 데이터를 받는데 쓰인다. 각각의 센서에서 날아오는 직렬 데이터를 설정된 시간에 맞춰 컴퓨터에 저장 할 수 있게 해준다. 센서로부터 오는 직렬 데이터를 타이머를 통해 나누어 받는 이유는 PC에서 제공하는 직렬 통신용 포트가 2개밖에 없기 때문이다. 즉 한 개는 PC에서 마우스가 쓰고 나머지 한 개를 가지고 여러 센서로부터 직렬 데이터를 받아야 되기 때문에 각각을 시분할을 할 수 밖에 없다. 그리고 각 센서에서 오는 데이터의 변화 폭이 급격히 변하지 않기 때

문에 문제가 되지는 않는다. 배양액 설정은 여기서 가장 중요한 부분이다. 각각의 배양액의 상태를 체크하고 또 필요시에는 자동모드, 수동모드로 전환해서 사용해야 하며, 작물이 자라는데 가장 핵심적인 내용이기 때문에 주의 깊게 다루어야 하는 부분이다. 탱크 내에서 EC, pH, 근온을 알려주는 센서들이 작동을 하고 이 센서에 맞추어 펌프를 가동시킨다. 따라서 작물을 잘 재배를 하기 위해서는 이 부분이 가장 잘 제어가 되어야 하는 부분이다. 항상 현재 값을 알려주는 부분과 자동으로 동작토록 값을 부여하는 부분, 수동으로 값을 부여하는 부분, 모드 변환을 하는 부분으로 나뉜다. 그림 5-28은 어떤 한 개의 설정판을 그림으로 나타내었다.

The image shows a 'Dialog' window with four sections for '탱크 1', '탱크 2', '탱크 3', and '탱크 4'. Each section contains a '제어방법' (Control Method) with radio buttons for '수동' (Manual) and '자동' (Automatic). Below this are three columns of input fields: '현재값' (Current Value) and '설정값' (Set Value) for 'EC', 'pH', and '근온' (Root Temperature). To the right of these are '배양액 공급시간' (Nutrient Supply Time) fields, with units of '분' (minutes) and '회' (cycles). On the far right of the dialog are two buttons: '예' (Yes) and '아니오' (No).

Fig. 5-28. Set-up window of default values for nutrient solution control

PC설정은 직렬 포트와 인터페이스 카드를 설정하는 부분이다. 마우스 포트를 제외한 나머지 한 개의 포트를 전송속도, 데이터 비트, 스톱 비트 등을 설정한다. 인터페이스 카드는 카드의 번지수와 수행 시 기능 등을 설정한다. 경고음 설정은 여러 센서의 설정 값과 일치하지 않거나 위험을 알릴 때 사용을 할 것이다. 주변기기 제어는 기타 다른 기기 및 환경 기기에 대하여 제어를 할 때 사용을 한다. 온실 감지는 온실의 내부/외부의 상황을 감시를 한다. 사용자 입장에서 좀더 편하게 제어를 할 수 있게 하기 위함이다. 파일은 센서에서 오는 데이터를 저장 관리를 위한 부분이다. 파일을 생성 보관을 주목적으로 한다. 보기는 메인 화면의 바에 대한 내용과 기타 다른 주의 사항 등을 볼 수 있다. 도움말은 말 그대로 도움말을 볼 수 있게 한다. 이러한 여러 가지 상태 등을 파악하고 또 그 결과에 알맞게 제어를 할 수 있도록 프로그램이 설계가 되었다. 사용자가 개인용 컴퓨터 앞에서 대부분을 설정하고 그 값에 맞게 제어가 될 수 있도록 소프트웨어를 만든다. 이제는 사용자가 좀더 편하고 부가가치를 높일 수 있도록 이런 설계 조건들이 도움을 줄 수 있다.

메인프레임 클래스

```
// TODO: Remove this if you don't want tool tips or a resizable toolbar
```

```
m_wndToolBar.SetBarStyle(m_wndToolBar.GetBarStyle() |
    CBRS_TOOLTIPS | CBRS_FLYBY | CBRS_SIZE_DYNAMIC);
```

```
// TODO: Delete these three lines if you don't want the toolbar to
```

```
// be dockable
```

```
m_wndToolBar.EnableDocking(CBRS_ALIGN_ANY);
```

```
EnableDocking(CBRS_ALIGN_ANY);
```

```
DockControlBar(&m_wndToolBar);
```

프로그램에서의 메인프레임은 전체적인 틀을 구성한다.

m_wndToolBar.SetBarStyle() 함수는 (m_wndToolBar.GetBarStyle() 함수와 함께

연동 하여 툴바를 생성하였다. m_wndToolBar. EnableDocking() 함수는 만들어진 툴바를 프레임에 붙이는 함수이고, EnableDocking() 함수는 붙은 툴바를 활성화를 시킨다. DockControlBar()는 툴바의 기능을 부여한다.

뷰 클래스

```
class CAuto_HSView : public CView
{
protected: // create from serialization only
    CAuto_HSView();
    DECLARE_DYNCREATE(CAuto_HSView)

// Attributes
public:
    CAuto_HSDoc* GetDocument();
    CSetTankDlg1 stDlg1;
    CSetTankDlg2 stDlg2;
    CAlarmDlg saDlg;

// Operations
public:
뷰클래스의 헤더 파일에 3개의 개체를 생성시킨다. (탱크가 8개인 경우)

////////////////////////////////////
void CAuto_HSView::OnDraw(CDC* pDC)
{
    CAuto_HSDoc* pDoc = GetDocument();
    ASSERT_VALID(pDoc);

    // TODO: add draw code for native data here
```

```

    CBitmap bm;
CDC dcMem;
CSize size(1000, 744);
bm.LoadBitmap(IDB_HOUSE);
dcMem.CreateCompatibleDC(pDC);
dcMem.SelectObject(&bm);
pDC->BitBlt(0, 0, 1024, 768, &dcMem, 10, 100, SRCCOPY);
    pDC->DPtoLP(&size);

```

이 부분은 비트맵을 프레임에 표시하는 부분이다. 각각의 변수를 선언하고 원하는 비트맵을 메모리에 가져온다. 메모리에 적재된 비트맵을 선택하고 BitBlt(0, 0, 1024, 768, &dcMem, 10, 100, SRCCOPY) 라는 함수로 디스플레이 장치에 표시를 한다.

```

////////////////////////////////////
// CAuto_HSView message handlers
void CAuto_HSView::OnControlTank1()
{
    // TODO: Add your command handler code here
    if ( IDOK == stDlg1.DoModal() )
    {
        UpdateData(FALSE);
    }
}
void CAuto_HSView::OnControlTank2()
{
    // TODO: Add your command handler code here
    if ( IDOK == stDlg1.DoModal() )

```

```

        {
            UpdateData(FALSE);
        }
    }

void CAuto_HSView::OnControlTank3()
{
    // TODO: Add your command handler code here
    if ( IDOK == stDlg1.DoModal() )
    {
        UpdateData(FALSE);
    }
}

void CAuto_HSView::OnControlTank4()
{
    // TODO: Add your command handler code here
    if ( IDOK == stDlg1.DoModal() )
    {
        UpdateData(FALSE);
    }
}

void CAuto_HSView::OnControlTank5()
{
    // TODO: Add your command handler code here
    if ( IDOK == stDlg2.DoModal() )
    {
        UpdateData(FALSE);
    }
}

```

```

void CAuto_HSView::OnControlTank6()
{
    // TODO: Add your command handler code here
    if ( IDOK == stDlg2.DoModal() )
    {
        UpdateData(FALSE);
    }
}

void CAuto_HSView::OnControlTank7()
{
    // TODO: Add your command handler code here
    if ( IDOK == stDlg2.DoModal() )
    {
        UpdateData(FALSE);
    }
}

void CAuto_HSView::OnControlTank8()
{
    // TODO: Add your command handler code here
    if ( IDOK == stDlg2.DoModal() )
    {
        UpdateData(FALSE);
    }
}

void CAuto_HSView::OnControlAlarm()
{
    // TODO: Add your command handler code here
    if ( IDOK == saDlg.DoModal() )

```

```

    {
        UpdateData(FALSE);
    }
}

```

각각의 함수는 뷰클래스 내의 함수들이며, 이 함수들은 모두 메시지 핸들러 함수를 사용한다. 배양액에 관련된 창을 열어 연결시켜준다 (탱크가 4개일 경우는 OnControlTank4() 까지만 쓴다.)

다. ACSMT 하드웨어 개발

배양액 제어의 기본 구조는 두 가지 모듈로 나눌 수 있다. 하나는 배양액 탱크에서 적절한 조성비의 배양액을 제어하는 모듈이고, 다른 하나는 적절하게 조성된 배양액을 일정한 양으로 공급 제어하는 부분으로 그것들의 제어도를 그림 5-29과 그림 5-30에서 볼 수 있다. 그림 5-29에서 볼 수 있듯이 EC, pH, 근온 센서들에 의하여 피드백 되는 정보에 의하여 정량 펌프가 제어되는 제어기 구조를 갖는다.

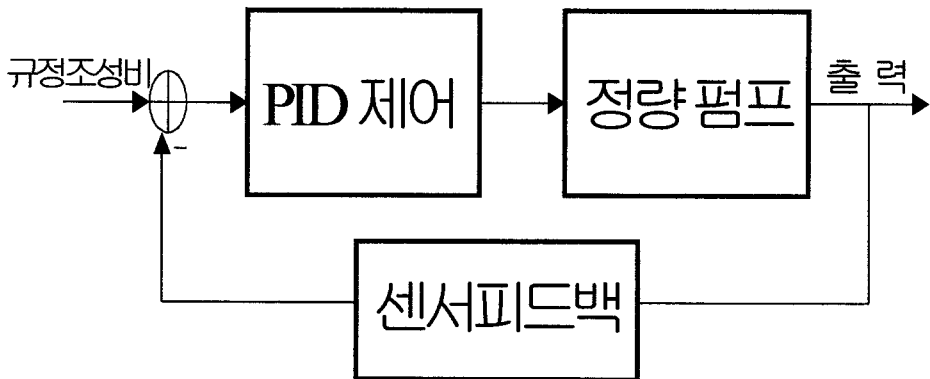


Fig. 5-29. Diagram of quantitative pump control

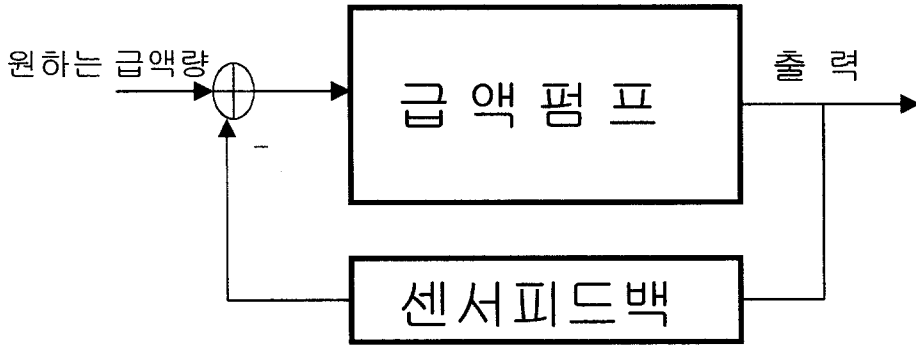


Fig. 5-30. Diagram of irrigating pump control

실제 제어기를 구현하는데 사용한 모든 하드웨어는 IBM PC의 ISA-BUS를 이용하여 인터페이스 되어 있으며, 센서 피드백을 위하여 18채널을 갖는 고속의 사용보드형 A/D 변환기를 사용하였으며, 펌프로 출력되는 제어출력 신호를 위한 32채널 디지털 입출력이 역시 인터페이스 되어 있다. 탱크당 3개의 센서를 운영하므로 4개의 탱크를 동시에 제어할 경우에 필요한 A/D 채널 수는 12개가 필요하고, 탱크별 디지털 출력 수는 4개이므로 본 연구에서 설계한 제어용 하드웨어가 그 사양(Spec.)들을 충족시키고 있다.

라. 비귀환(Feedforward) 계획 제어 시스템의 완성

자동 제어에서는 사용자가 상한 값과 하한 값을 입력을 하면 그 정해진 범위에서 움직인다. 작물을 재배하는 경우 이러한 자동제어도 필요하지만 그렇지 않은 경우도 있다. 이렇게 사용자가 임의로 자동 제어의 값과는 상관없이 오로지 사용자의 정의대로 값을 주는 방법을 프로그램을 구축을 하였다. 그림 5-31에서는 비귀환 계획 제어 시스템에 대해 나타내었다. 계획 제어 시스템을 선택하면 탱크 1에서 탱크 8까지 팝업 메뉴가 나온다. 흐름도에서 가장 위에 보이는 조건이 바로 탱크를 선택하는 방법이다. 탱크를 선택하면 각 탱크마다 1일차부터 7일차까지 1주일동안의 각 시간이 나온다. 이렇게 하루동안 사용자가 자동으로 펌프를 돌리지

않고 직접 펌프의 동작시간을 줄 수 있게 되어있다. 프로그램은 이렇게 설정해 놓은 시간을 데이터로 만들어 1주일을 그 데이터대로 펌프를 동작한다. 흐름도에서 I/O실행이 바로 펌프를 돌리기 위해 DIO보드에 신호를 보내는 부분이다. 물론 각 탱크는 계획 제어로 설정되면 자동 제어부분 프로그램의 영향을 받지 않는다. 계획 제어는 사용자의 경험을 바탕으로 배양액의 조성비와 공급을 편리하게 제어할 수 있다.

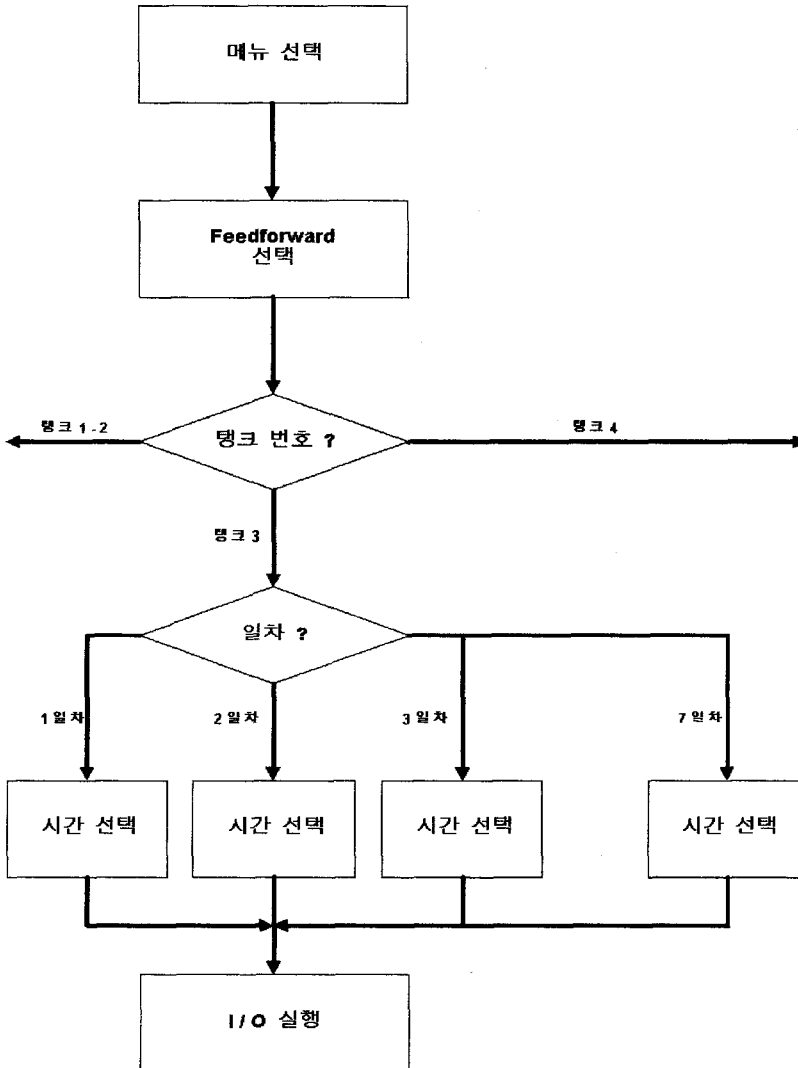
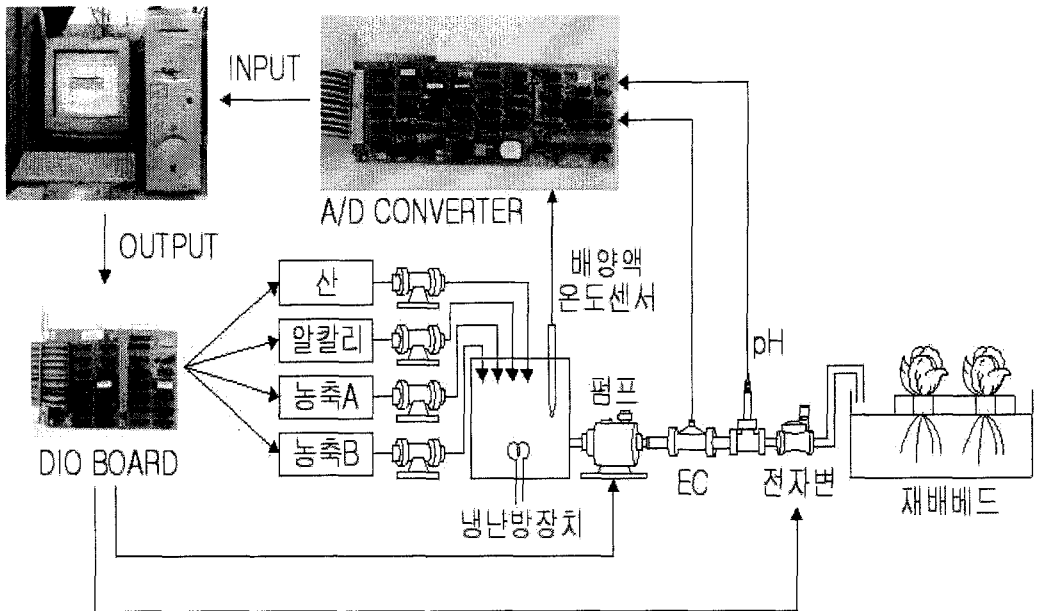


Fig. 5-31. Flow chart of feedforward control system

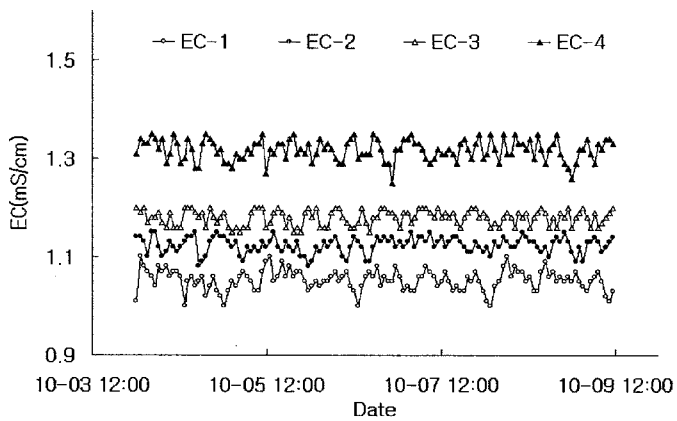
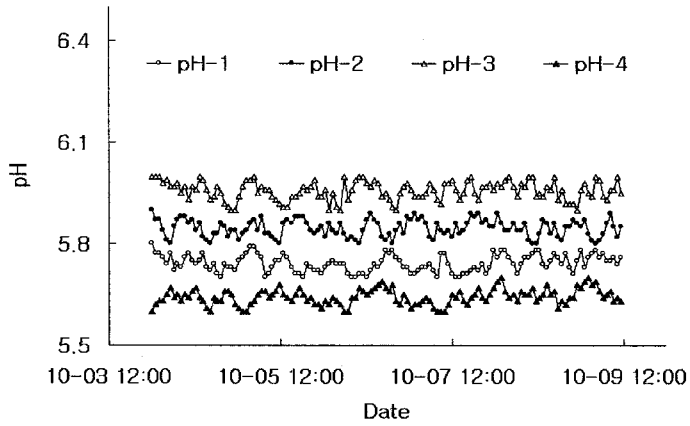
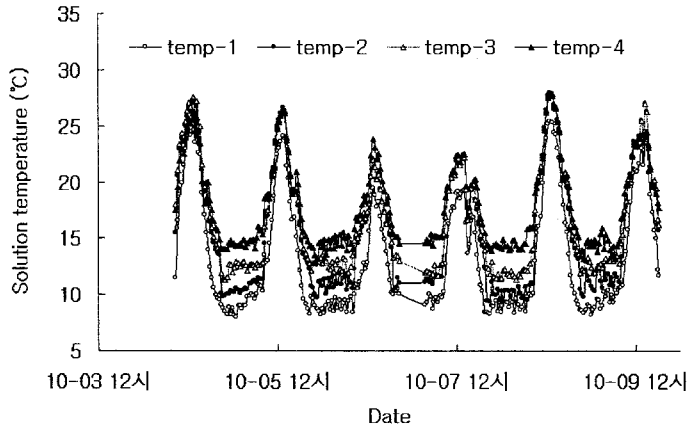
마. 환경과 배양액 종합 관리 시스템 운영

구축한 ACSMT의 전체 모식도는 다음과 같다. 단, 배양액 공급장치는 4개를 구축하였다. 각 배양액 공급장치는 재배베드, 배양액 공급 펌프, 탱크, 산알칼리 펌프, 농축 배양액 펌프, 액온센서, pH센서, EC센서, 지연 timer, magnet, transmeter 등으로 구성하였다.



ACSMT system의 성능을 분석하여 운영하기 위해서 각 설정값을 4가지로 정한 후, 근온, pH, EC를 측정, 제어한 결과는 다음과 같다. 배양액 온도는 최저온도를 설정하여 난방한 결과이며, pH와 EC는 변동폭을 0.1로 각각 할당된 결과이다.

운영한 결과, 제어능력은 뛰어난 것으로 판단되었다. 단, 사용자가 사용하기 편하게 user interface를 개선할 필요성이 나타났다. 따라서, 본 시스템은 현재 작동 안정성을 높이고, user interface를 개선하고 있다.



3. 적요

ACSMT(Automatic Control System for Multi-Tanks of Nutrient Solution)을 개발하기 위해서 하드웨어는 크게 개인용 컴퓨터, 센서장비, 인터페이스 카드 그리고 멀티 포트로 나누어서 설계하였다. ACSMT의 소프트웨어는 Windows 환경에서 Visual C++5.0을 개발 툴(Tool)로 사용하였다. 프로그램의 속도와 개발 기간을 단축하고 실제 시설 내에서 엽채류를 재배하는 사용자가 반드시 필요한 기능만을 간편하게 사용할 수 있도록 최적의 GUI기법을 사용하였다. Button형 등의 팝업(Pop-up) 메뉴는 간편한 풀다운(Pull-down) 메뉴만으로 대체하였다. 또한 사용자가 임의로 자동 제어의 값과는 상관없이 오로지 사용자의 정의대로 값을 주는 비례환 계획 제어 시스템을 구축하였다. 각 배양액 공급장치는 재배베드, 배양액 공급 펌프, 탱크, 산알칼리 펌프, 농축 배양액 펌프, 액온센서, pH센서, EC센서, 지연 timer, magnet, transmeter 등으로 구성하였다. 각 설정값을 4가지로 정한 후, 근온, pH, EC를 측정, 제어하여 ACSMTsystem의 성능을 분석하였다.

제 5절 완전폐쇄형 배양액 관리 자동화 시스템 개발

1. 재료 및 방법

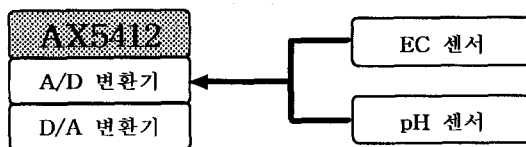
기존에 상용화된 배양액 제어 시스템은 실질적으로 하나의 배양액 탱크만을 자동 제어하였다. 엽채류 생산의 경우 실제로 한 농가가 여러 작물을 재배하는 경우가 많은데, 배양액관리 시스템은 고가이기 때문에 한 개의 시스템으로 모든 작물을 생산하고 있다. 이로 인하여 재배작물 혹은 같은 작물이라도 생육단계에 적합한 배양액을 공급할 수 없어 최적의 생장을 이행할 수 없었으며 배양액의 손실이 존재하였다. 그런 문제들을 해결하기 위해서 여러 개의 배양액 조성을 한 개의 시스템으로 관리할 수 있는 시스템이 필요로 한다.

2. 결과 및 고찰

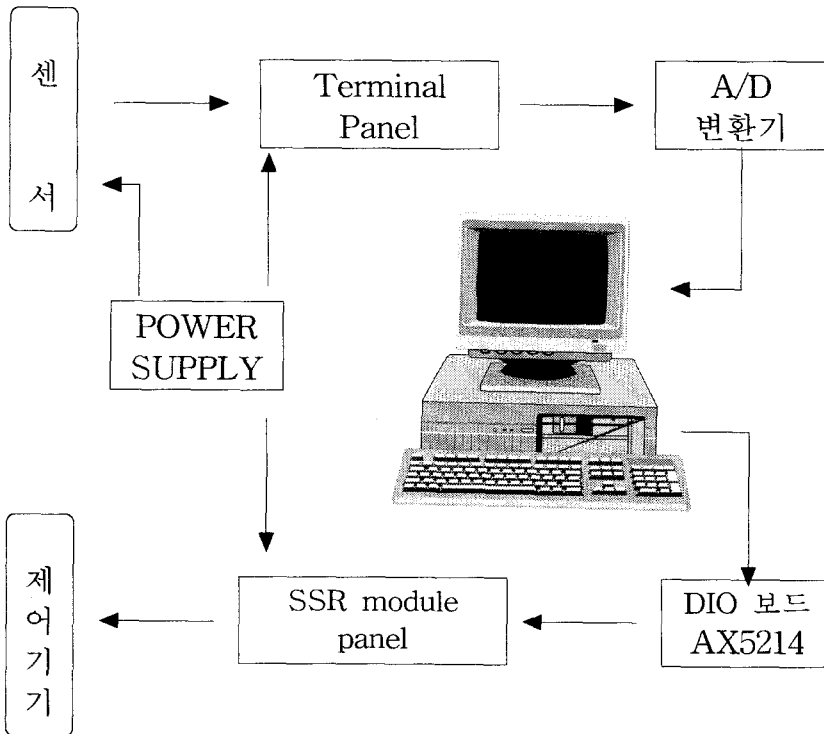
가. 전체 시스템 구성

1) 하드웨어 구조

하드웨어는 크게 개인용 컴퓨터, 센서장비, 인터페이스 카드로 구성이 된다. 개인용 컴퓨터에 인터페이스 카드를 장착해 센서장비로부터 데이터를 받는다. 또한 직렬포트를 사용해서 받기도 한다. 센서장비로부터 오는 신호를 디지털 데이터로 바꾸기 위해서 인터페이스 카드를 사용한다. 인터페이스 카드는 AD변환기와 DA변환기를 가지고 있는 카드와 디지털 입출력 신호를 위한 카드로 나누어진다.



그림은 AD변환기와 DA변환기를 내장한 AX5412 카드이다. 이 인터페이스 카드는 각 센서(EC , pH , 온도)의 출력 단자가 보드의 터미널을 통해 보드와 직접 연결이 되어 있다. 센서의 출력은 전압으로 출력하는 것과 전류로 출력하는 것이 있는데 전압으로 출력을 하면 터미널에 바로 연결을 하고 전류로 출력을 하면 출력 양단에 Sunt Resistor를 연결하여 전류를 전압으로 바꾸어 연결을 한다. 인터페이스 카드를 하드웨어 세팅을 하는 것은 운영체제가 사용하지 않는 빈 I/O번지를 찾아 스위치를 세팅을 하면 된다. 빈 번지를 찾아 세팅을 하는 것은 DIO보드도 같은 방법으로 한다. AX5412에서 만들어진 데이터를 비교해 펌프 등을 가동할 것인지 아닌지를 판단한다. 펌프를 가동하는 것은 DIO보드에서 한다. DIO보드도 터미널에 연결하여 사용을 한다. DIO보드는 터미널로 5V 신호를 내보낸다. 이 5V 신호를 ULN2003으로 증폭을 하여 릴레이를 동작을 하게된다. 릴레이는 5V 보다 큰 전압을 사용하기 위해서 터미널에 장착이 되어있다.

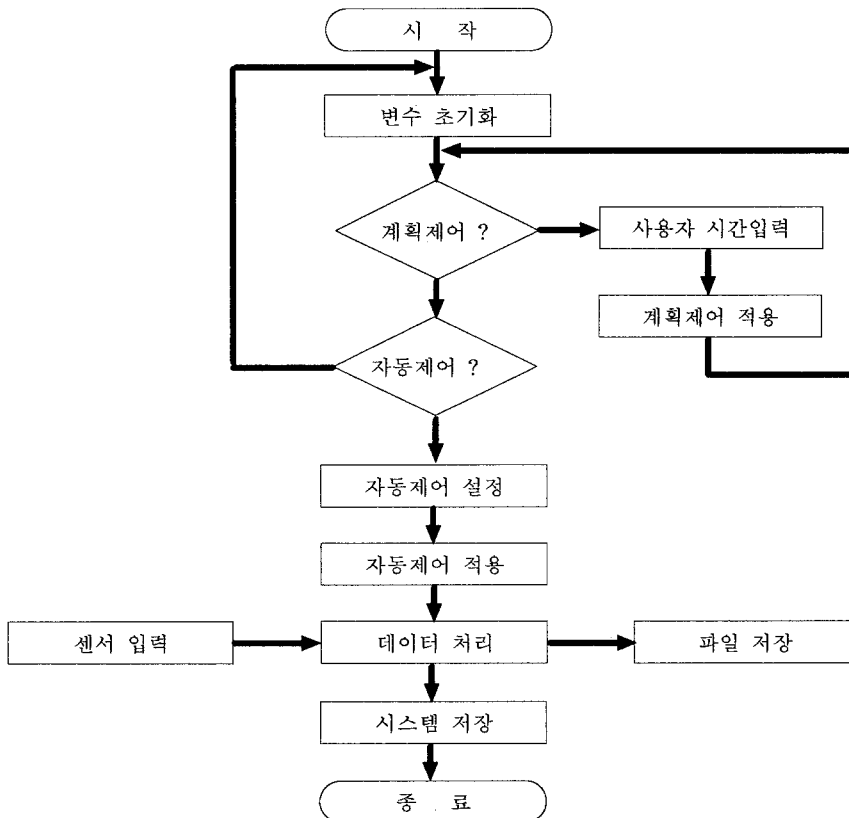


본 연구에서 탱크별 센서들은 EC와 pH 그리고 근온센서로, 배양액의 적절한 조성을 위하여 기본적으로 필요한 센서들을 PC 인터페이스 기술을 이용하여 고속 A/D 변환기를 통하여 정확하게 자동제어 프로그램과 연결하며, 그것을 제어기를 거쳐 배양액의 적절한 조성을 위한 액츄에이터인 정량펌프와 베드에 적절하게 조성된 배양액을 적절한 양으로 적절한 시간에 공급하는 급액 펌프를 제어하기 위하여 제어 프로그램과 디지털 입출력 보드를 이용하여 인터페이스 하였다. 현재는 배양액 탱크의 수를 4개로 운영하고 있으나 차후에는 8개까지 증가시킬 계획이며, 탱크별로 독립 제어하면서 탱크별 순서제어(Sequence Control)가 가능한 첨단 제어 기술을 적용한 시스템이면서 또한 사용이 간편한 대중형 배양액 제어 시스템이다.



2) 소프트웨어 구조

소프트웨어는 하드웨어를 조작을 하고 이 하드웨어로부터 데이터를 주고받으며 제어 이론을 사용해 사용자가 의도한 대로 작동을 한다. PC의 대부분이 윈도우즈를 기반으로 구축이 되어있으므로 소프트웨어 역시 윈도우즈를 기반으로 되어있다. 소프트웨어의 대부분이 메뉴에서 시작을 한다. 메뉴에서 설정할 부분을 설정하고 또 명령 또는 선택을 한다. 다음은 소프트웨어적 제어를 흐름도로 나타내었다.



시스템 설정은 하드웨어적인 세팅값을 프로그램에 맞게 소프트웨어 적으로 설정을 하는 곳이다. 탱크의 설정에 대한 부분이다.

여기서는 사용자가 사용하는 탱크의 작물의 이름을 적을 수 있고 또 사용여부를 표시를 한다.

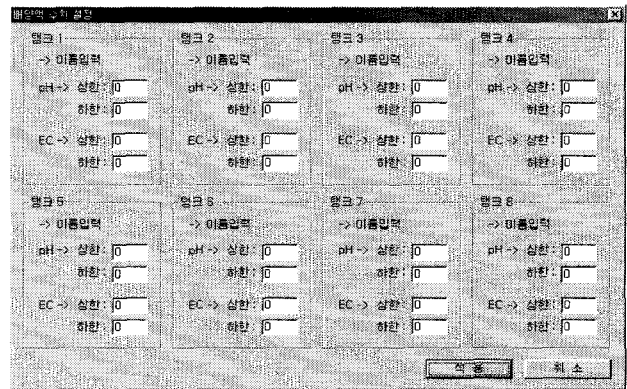
이렇게 설정된 값들은 각 탱크의 개별적인 정보변수로 들어간다. 프로그램상에서 탱크의 개별 정보는 모든 클래스에서 공통적으로 공유를 해서 사용하게 된다.

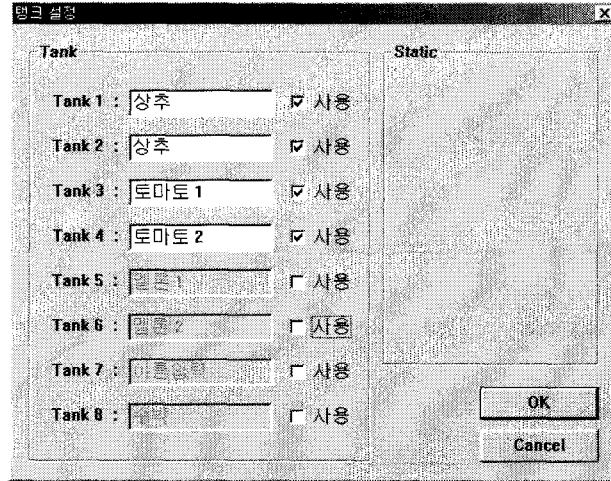
```

struct TankInfo
{
    BOOL    UserUsed;
    CString Caption;
    int     ID;
    float   EC_H, EC_L, PH_H, PH_L;
};
    
```

다음에는 센서 설정이 있다. 이 센서설정은 센서 사용상 좀더 빠르고 편하게 하기 위해서 만들어진 부분이다.

센서 설정을 선택하면 윈도우 창이 생성된다. 이 생성된 창에 각 센서에 대한 결과 값이 표시가 된다. 창이 생성이 되어있으면 센서에서 읽어져 현재 변환기를 거쳐 들어오는 센서 값이 계속해서 표시가 된다. 이러한 기능은 현재 값이 어떻게 들어오는 지를 보고 싶을 때 사용이 될 수 있고, 가장 중요한 것은 센서의 영점 조정을 할 때 사용하기 위해서 이다. 영점이 잡히지 않은 센서의 값은 정확한 값을 얻기 힘들기 때문이고 센서 값이 선형적으로 출력이 나온다는 보장이 없기 때문에 영점은 정확해야 한다.



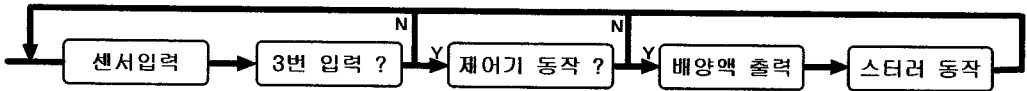


소프트웨어적인 영점 조정을 위해 함수를 제공한다. 이러한 함수도 특성곡선이 선형적인 값을 가져야만 쓸 수 있다. 이 함수가 실행이 되면 상대적인 영점 값이 만들어진다. 이러한 함수는 센서에서 영점 조정이 곤란할 때 사용하기 위해 만들었다. 따라서 사용자는 각 센서의 값을 보고 센서를 조정하는 방식이 필요하다. 여기서는 프로그램에 센서 조정에 관한 창을 만들었으며 이 창을 통해 현재 센서 값에서부터 과거 4개의 값을 한번에 보며 센서를 조정할 수 있다. 프로그램이 실행이 된 후 이 메뉴를 선택해 영점을 조정하든지 센서 값만을 보던지 창이 활성화 되어있으면 계속해서 값을 출력을 한다. 다음 메뉴는 자동제어이다. 다음은 자동제어에 관한 활성화 창이다. 자동제어 창에서 상한 값과 하한 값을 입력한다. 그리고 P, I의 각 게인 값은 사용자 정의에 표시되어 있는 에디터에 입력을 한다. 퍼지는 이러한 게인 없이 상한과 하한 값만 넣어주면 된다. 이렇게 설정이 된 값은 제어기에 의해 펌프를 ON, OFF하며 원하는 결과를 줄 것이다.

자동제어를 선택을 하면 다시 8개의 탱크목록이 나온다. 거기서 원하는 탱크를 선택해서 값을 입력하면 된다. 다음 메뉴는 계획제어이다. 계획제어는 자동으로 값을 맞춰 주는 것이 아니고 사용자가 직접 펌프의 동작시간을 임의로 설정해 주는 것이다.

3) ACSMT개발에 적용된 기술

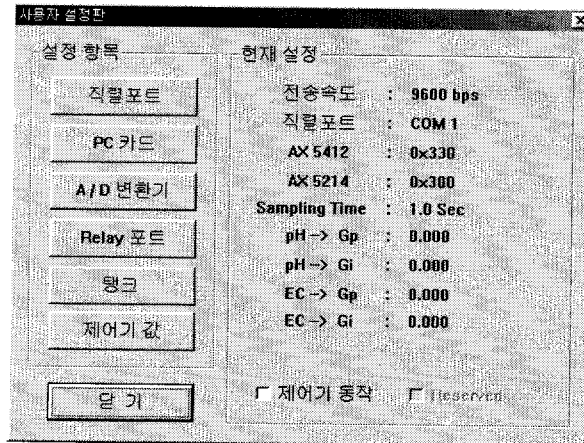
그 동안 하나의 Host 컴퓨터에서는 단일 자동제어 소프트웨어를 이용하여 복수개의 배양액 탱크를 병렬로 통합 제어하는 것이 어려운 상황에 있었으나, Windows PC상에서 Visual C++ 프로그램 틀을 이용하여 복수개의 제어모듈을 제어하는 것이 가능해졌다. 그 것은 복수개의 프로그램의 모듈을 운영하는 기술과 Tank별 제어모듈을 실시간으로 스케줄링하는 기술이다.



나. ACSMT의 소프트웨어 설계 및 개발

소프트웨어는 Windows 환경에서 Visual C++6.0을 개발 툴(Tool)로 사용하였다.

프로그램의 속도와 개발 기간을 단축하고 실제 시설 내에서 업체류를 재배하는 사용자가 반드시 필요한 기능만을 간편하게 사용할 수 있도록 최적의 GUI기법을 사용하였다. Button형 등의 팝업(Pop-up) 메뉴는 간편한 풀다운(Pull-down) 메뉴만으로 대체하였다.



배양액 설정은 여기서 가장 중요한 부분이다. 각각의 배양액의 상태를 체크하고 또 필요시에는 자동모드, 수동모드로 전환해서 사용을 하여야 하며, 작물이 자라는데 가장 핵심적인 내용이기 때문에 주의 깊게 다루어야 하는 부분이다. 탱크 내에서 EC, pH, 근온을 알려주는 센서들이 작동을 하고 이 센서에 맞추어 펌프를 가동시킨다. 따라서 작물을 잘 재배를 하기 위해서는 이 부분이 가장 잘 제어가 되어야 하는 부분이다. 항상 현재 값을 알려주는 부분과 자동으로 동작토록 값을 부여하는 부분, 수동으로 값을 부여하는 부분, 모드 변환을 하는 부분으로 나뉜다.

PC설정은 직렬 포트와 인터페이스 카드를 설정하는 부분이다. 마우스 포트를 제외한 나머지 한 개의 포트를 전송속도, 데이터 비트, 스톱 비트 등을 설정한다. 인터페이스 카드는 카드의 번지수와 수행 시 기능 등을 설정한다. 경고음 설정은 여러 센서의 설정 값과 일치하지 않거나 위험을 알릴때 사용을 할 것이다. 인터페이스 카드의 주소를 입력하는 방식은 절대적인 핵사 값이다.

```

int CSetDlg::char2dec(char ch)
{
    int ret;

    switch(ch)
    {
        case '0': ret = 0;   break;
        case '1': ret = 1;   break;
        case '2': ret = 2;   break;
        case '3': ret = 3;   break;
        case '4': ret = 4;   break;
        case '5': ret = 5;   break;
        case '6': ret = 6;   break;
        case '7': ret = 7;   break;
        case '8': ret = 8;   break;
        case '9': ret = 9;   break;
        case 'a':
        case 'A': ret = 10;  break;
        case 'b':
        case 'B': ret = 11;  break;
        case 'c':
        case 'C': ret = 12;  break;
        case 'd':
        case 'D': ret = 13;  break;
        case 'e':
        case 'E': ret = 14;  break;
        case 'f':
        case 'F': ret = 15;  break;
        default:  ret = 33;  break;
    }
    return ret;
}

```

```

int CSetDlg::Hex2Dec(char *ch)
{
    int buff0, buff1, buff2, ret_value;
    char *addr;

    addr =ch;
    buff0 = char2dec(addr[0]);
    buff1 = char2dec(addr[1]);
    buff2 = char2dec(addr[2]);
    ret_value = buff0*256 + buff1*16 + buff2;

    return ret_value;
}

```

이 값은 프로그램에서는 문자열로 받기 때문에 이 문자열을 다시 필요한 정수로 바꾸는 모듈이 존재해야 한다. 파일은 센서에서 오는 데이터를 저장 관리를 위한 부분이다. 파일을 생성 보관을 주목적으로 한다. 연속적인 데이터를 날짜 시간

대 별로 생성하고 그 데이터를 사용해 생물의 최적 환경을 만드는 중요한 자료를 생성한다.

도움말은 말 그대로 도움말을 볼 수 있게 한다. 이러한 여러 가지 상태 등을 파악하고 또 그 결과에 알맞게 제어를 할 수 있도록 프로그램이 설계가 되었다. 사용자가 개인용 컴퓨터 앞에서 대부분을 설정하고 그 값에 맞게 제어가 될 수 있도록 소프트웨어를 만든다. 이제는 사용자가 좀더 편하고 부가가치를 높일 수 있도록 이런 설계 조건들이 도움을 줄 수 있다.

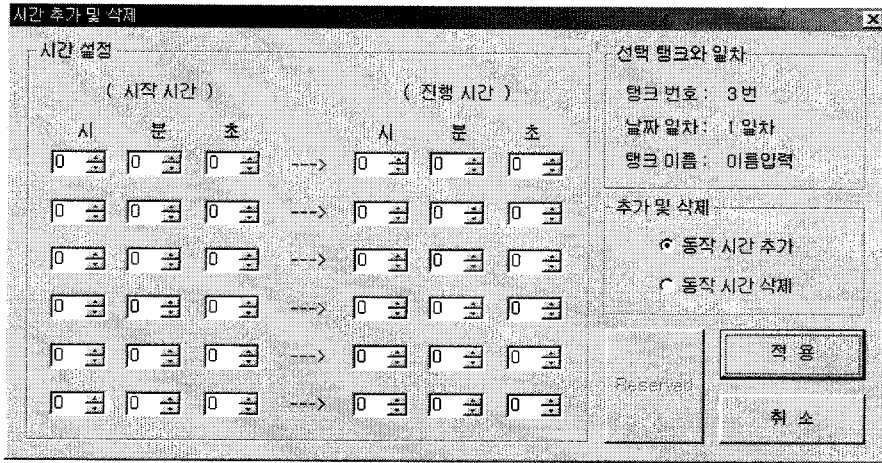
실제 제어를 구현하는데 사용한 모든 하드웨어는 IBM PC의 ISA-BUS를 이용하여 인터페이스 되어 있으며, 센서 피드백을 위하여 16채널을 갖는 고속의 A/D 변환기를 사용하였으며, 펌프로 출력되는 제어출력 신호를 위한 32채널 디지털 입출력이 역시 인터페이스 되어 있다. 탱크당 3개의 센서를 운영하므로 4개의 탱크를 동시에 제어할 경우에 필요한 A/D 채널 수는 12개가 필요하고, 탱크별 디지털 출력 수는 5개이므로 전체 디지털 출력은 20개이다. 본 연구에서 설계한 제어용 하드웨어가 그 사양(Spec.)들을 충족시키고 있다.

다. 비례환(Feedforward) 계획 제어 시스템의 완성

자동 제어에서는 사용자가 상한 값과 하한 값을 입력을 하면 그 정해진 범위에서 움직인다. 작물을 재배하는 경우 이러한 자동제어도 필요하지만 그렇지 않은 경우도 있다. 이렇게 사용자가 임의로 자동 제어의 값과는 상관없이 오로지 사용자의 정의대로 값을 주는 방법을 프로그램을 구축을 하였다. 다음은 비례환 계획 제어 시스템에 대해 나타내었다. 계획 제어 시스템을 선택하면 탱크 1에서 탱크 8까지 팝업 메뉴가 나온다.

탱크를 선택하면 각 탱크마다 1일차부터 7일차까지 1주일동안의 각 시간이 나온다. 이렇게 하루동안 사용자가 자동으로 펌프를 돌리지 않고 직접 펌프의 동작 시간을 줄 수 있게 되어있다. 프로그램은 이렇게 설정해 놓은 시간을 데이터로 만들어 1주일을 그 데이터대로 펌프를 동작한다. 물론 각 탱크는 계획 제어로 설정되면 자동 제어부분 프로그램의 영향을 받지 않는다. 계획 제어는 사용자의 경험

을 바탕으로 양분 조절을 할 수 있게 만들어 졌다. 그러나 프로그램에서 배양액내에서의 수치는 계속 자동으로 조절이 되고 있다.



라. 배양액 조성비 제어

그림은 5-32는 배양액 조성비 제어의 블록선도를 나타낸 것이다.

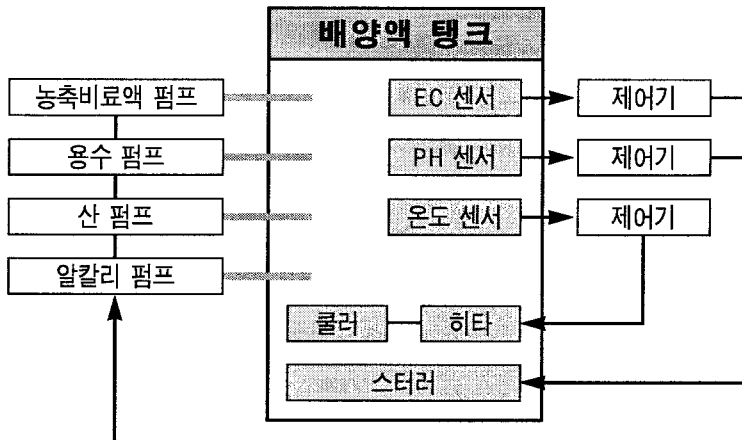


Fig. 5-32. Block diagram of control of nutrient solution composition ratio

배양액 조성비 제어는 작물에게 급액할 배양액의 pH수치와 EC수치를 자동으로 조절해 주는 제어이다. 배양액 탱크 안에는 pH, EC, 온도 센서가 배양액 탱크 내부에서 현재 센서 수치를 제어기로 보내게 된다. 각 제어기는 사용자가 설정한 수치를 유지하기 위해 액츄에이터를 동작하게 된다. 본 논문에서 구현한 시설재배 자동화 시스템의 프로그램은 시설재배 자동화 프로그램에서 조성비제어는 사용자가 자동제어모드로 사용을 하거나 아니면 시간 계획 제어 모드로 사용을 하더라도 항상 동작을 한다. 사용자가 조성비 제어가 필요한 센서를 설정하면 조성비 제어는 시작된다.

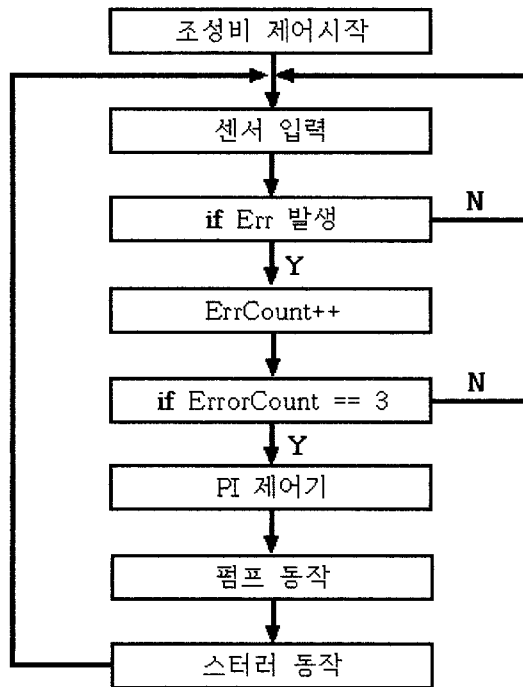


Fig. 5-33. Control program of nutrient solution composition ratio

배양액 조성비 제어는 설정값이 결정이 되면 동작을 시작한다. 그림 5.2에서처럼 센서입력을 먼저 받는다. 본 논문에서 사용한 프로그램은 배양액이 액체이기 때문에 pH수치나 EC수치를 정확하게 판단하기 위해 10초의 간격으로 3번 에러를

찾게된다. 3번 연속으로 에러가 발생을 하면 현재 수치의 에러를 피드백시켜 제어기를 동작을 시킨다. PI제어기를 통해 펌프가 동작되면 30초 동안 스티러를 동작시켜 배양액이 잘 섞이도록 동작을 한다. pH수치나 EC수치는 바운드를 두기 때문에 작물에 큰 영향을 미치지 않을 정도의 에러에서는 제어기가 동작을 하지 않는다.

마. 배양액 조성비 제어 알고리즘

배양액 탱크의 센서에서 현재의 pH와 EC를 읽어들이게 되어있다. 이렇게 읽어들이는 센서값과 사용자가 설정한 값을 비교해 그 오차만큼 PI 제어기가 동작을 하여 사용자의 설정값을 유지하게 된다.

다음 그림은 PI 제어기를 블록선도로 나타내었다.

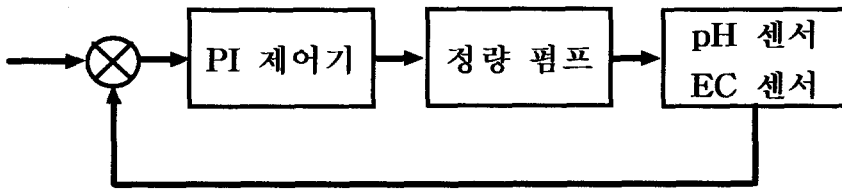


Fig. 5-34. Block diagram of control of nutrient solution composition ratio

본 연구에서 사용한 PI 제어기의 기본 식이다.

$$Error = r - y$$

$$Pump_I = G_p \cdot Error + G_i \cdot \int Error$$

본 연구에 사용된 시스템의 펌프는 분당 출력이 75ml 인 펌프를 사용하였다. 예를 들어 1초 동안에 산펌프를 가동시키면 배양액 내의 산도(pH수치)는 0.03이 올

라간다. 즉 초당 1.25ml이고 pH수치를 0.01증가시키는데 필요한 양은 0.42ml가 된다. PI제어기에서 두 계인의 값을 다음과 같이 정의하였다.

$$G_P = 42, \quad G_I = 0.03$$

그러므로 현재 발생한 Error는 PI제어기의 입력으로 사용을 한다.

PI제어기를 통해 나오는 출력을 0.42ml/sec으로 나누어 동작시간을 결정한다. PI제어기의 출력 $Pump_I$ 는 정량펌프를 가동하는 시간으로 된다.

$$T_{PUMP} = Pump_I \div 0.42 \text{ ml/sec}$$

바. ACSMT 프로그램 상추 생육에 적용

ACSMT 프로그램의 성능을 검사하기 위해서 네 베드에 동일하게 pH는 5.7~5.8의 범위를 유지하게 하였고 EC는 1.1~1.2의 수준을 유지하게 하였다. 각 베드별로 측정, 제어한 결과 지속적으로 설정값을 유지하였다.

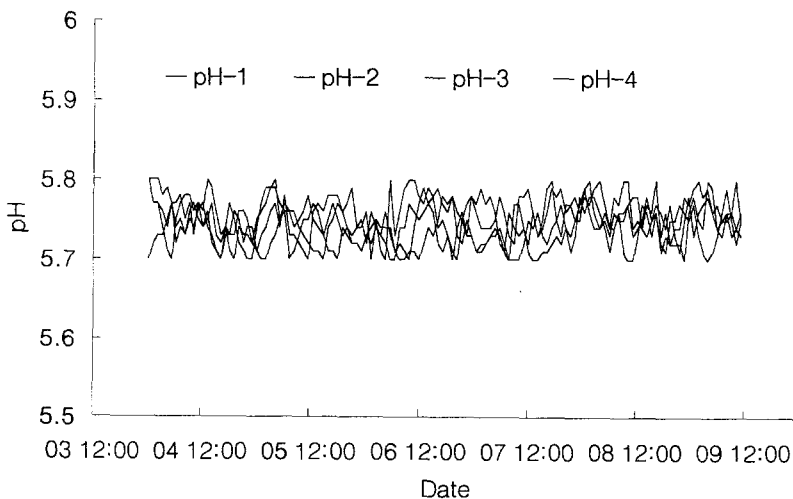


Fig. 5-35. pH controlled by ACSMT program

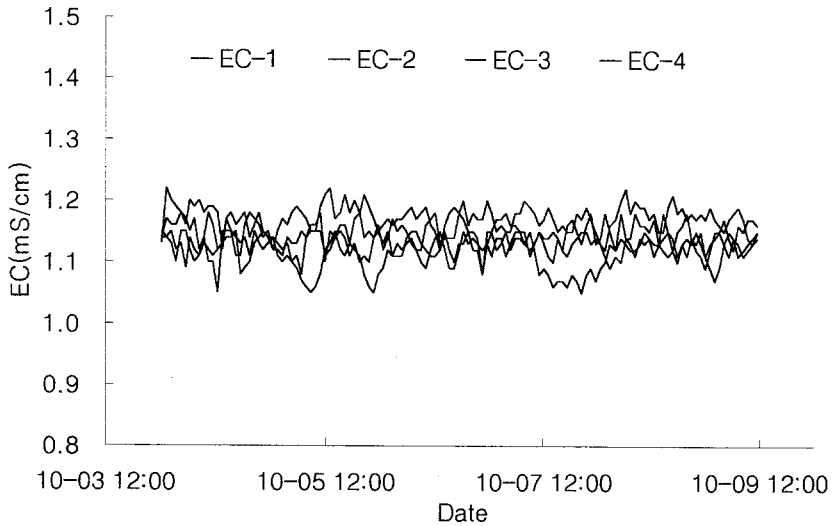


Fig. 5-36. EC controlled by ACSMT program

3. 적요

배양액 종합 관리 시스템(Automatic Control System for Multi- Tanks of nutrient solution: ACSMT)을 개발하여 개발된 program을 프로그램 심의 조정 위원회에 등록하였다. PC로 관리하는 완전폐쇄형 동적 자동제어 양액재배 생산 시스템을 PC와 연결하여 실제 상추 재배에 적용하여 우수한 생산효과를 보았다.

참 고 문 헌

- Acock, B. 1974. The design and use of growth chamber for investigating the effects of environmental factors in the plant growth. *Acta Hort.* 39:15-38.
- Adams, P. 1980. Nutrient uptake by cucumber from recirculating solution. *Acta Hort.* 98:119-126.
- Adams, P. 1991. Effect of diurnal fluctuation in humidity on the accumulation of nutrients in the leaves of tomato. *J. Hort. Sci.* 65:545-555.
- Adams, P. 1992. Crop nutrition in hydroponics. *Acta Hort.* 323:289-305.
- Adams, P. and A. R. Smith. 1993. Crop nutrition in hydroponics. *Acta Hort.* 323 : 289-305.
- Adams, P. and D.J. Hand. 1993. Effects of humidity and Ca level on dry matter and Ca accumulation by leaves of cucumber. *J. Hort. Sci.* 68:767-774.
- Adams, P. and L.C. Ho. 1995. Differential effects of salinity and humidity on growth and Ca status of tomato and cucumber grown in hydroponic culture. *Acta Hort.* 401:357-363.
- Adams, P. and R. Holder. 1992. Effects of humidity, Ca and salinity on the accumulation of dry matter and Ca by the leaves and fruit of tomato. *J. Hort. Sci.* 67:137-142.
- Adams, P. and S. Leoni. 1994. Nutrition of greenhouse vegetables in NFT and hydroponic systems. *Acta Hort.* 361 : 245-257.
- Addiscolt, T.M. 1974. Potassium and the distribution of calcium and magnesium in potato plants. *J. Sci. Food Agri.* 25:1173-1183.
- Albright, L. D. and A. J. Both. 1999. Dimensionless growth curves as a simple approach to predicting vegetative growth of lettuce. *Acta Hort.* 507:293-300.
- Al-Harbi, A.R., and S.W. Burrage. 1992. Effect of NaCl salinity of cucumber *Cucumbers sativus* L. grown in NFT. *Acta Hort.* 323:39-50.

- Allan, A.C. and R.H. Rubery. 1991. Calcium deficiency and auxin transport in *Cucubita pepo* L. seedlings. *Planta*. 183:604-612.
- Allen, L.H., Jr. 1979. Potentials for carbon dioxide enrichment. p. 500-519. In B.J. Barfield and J.F. Gerber (ed.) *Modifying the aerial environment of plants*. Monograph of the American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI.
- 안우범, 이병일. 1991. 미나리의 수경재배체계 개발에 관한 연구. II. 양액중의 다량 요소조성. *한원지* 32:425-433.
- Anonymous. 1992. *Agricultural statistics*. US Government Printing Office. Washington.
- Ashkar, B.A. and S.K. Ries. 1971. Lettuce tipburn as related to nutrient imbalance and nitrogen composition. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 96:448-452.
- Aston, M.J. and D.W. Lawar. 1979. The relationship between transportation, root water uptake and leaf water potential. *J Exp. Bot.* 30:169-181.
- Atta-Aly, M.A., M.E. Saltveit, and A.S. El-Beltagy. 1992. Effect of salt stress on the vegetable growth and development of tomato plant. *Acta Hort.* 323:401-410.
- Bakker, J.C. 1984a. Water vapour transport from a greenhouse by ventilation. II: Effects of cucumber. *Acta Hort.* 148:543-546.
- Bakker, J.C. 1984b. Physiological disorders in cucumber under high humidity conditions and low ventilation rates in greenhouses. *Acta Hort.* 156:257-264.
- Bakker, J.C. 1986. The effects of humidity on growth and production of greenhouse cucumber, tomatoes, and sweet pepper. *Acta Hort.* 176:257-264.
- Bakker, J.C. 1989. The effects of air humidity on growth and fruit production of sweet pepper. *J. Hort. Sci.* 64:41-46.
- Bakker, J.C. 1990. Effects of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse tomatoes. *J. Hort. Sci.* 65:323-331.

- Bakker, J.C. and C. Sonneveld. 1988. Calcium deficiency of greenhouse cucumber as affected by environmental humidity and mineral nutrition. *J. Hort. Sci.* 64:241-246.
- Bakker, J.C., G.W.H. Welles, and J.A.M. Van Uffelen. 1987. The effects of day and night humidity on yield and quality of glasshouse cucumber. *J. Hort. Sci.* 62:363-370.
- Baldet, P., C. Alban, R. Douce. 1997. Biotin synthesis in higher plants : purification and characterization of *bioB* gene product equivalent from *Arabidopsis thaliana* overexpressed in *Escherichia coli* and its subcellular localization in pea leaf cells. *FEBS lett.* 419 : 206-210.
- Bangerth, F. 1979. Calcium-related physiological disorders of plants. *Ann. Rev. Phytopathol.* 17:97-122.
- Barker, A.V. and K.A. Corey. 1988. Ethylene evolution by tomato plants under nutrient stress. *HortScience* 23(1):202-203.
- Barry, J.A. and O. Bjorkman. 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plant. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31:491-543.
- Barta, D.J. and T.W. Tibbitts. 1991. Calcium location in lettuce leaves with and without tipburn; Comparison of controlled-environment and field-grown plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116(5):870-875.
- Bar-Tal, A. and E. Pressman. 1996. Root restriction and potassium and calcium solution concentrations affect dry-matter production, cation uptake and blossom-end rot in greenhouse tomato. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121(4):649-655.
- Belanger, F. C. T. Leustek, B. Chu, and A. Kriz. 1995. Evidence for the thiamine biosynthetic pathway in higher-plant plastids and its developmental regulation. *Plant Mole. Biol.* 29 : 809-821.
- Benoit, F. 1992. Practical guide for simple soilless culture techniques. p28-37. European Vegetable R&D Center Belgium.

- Benoit, F. and N. Ceuwtermans. 1993. Growing tomatoes on ecologically sound substrates. *Plastic Culture*. 97 : 41~47.
- Benoit, F. and N. Ceuwtermans. 1994a. A decade of the Sino-International Colloquium on Soilless Culture, Hangzhou, China, 22-26. May 1994 : 68~79.
- Benoit, F. and N. Ceuwtermans. 1994b. Growing cucumber on ecologically sound substrates. *Acta Hort*. 396 : 55~66.
- Bot, J. Le, S. Adamowics, and P. Robin. 1998. Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Sci. Hort*. 74:47-82.
- Bradburd, M. and R. Ahmad. 1996. Effect of humidity on growth of lettuce under saline condition. *Pakistan J. Bot*. 28(1):97-102.
- Bradfield, E.G., and C.G. Guttridge. 1979. The dependence of calcium transport and tipburn in strawberry on relative humidity and nutrient solution concentration. *Ann. Bot*. 43:363-372.
- Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantization of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem*. 72:248-254.
- 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.
- Bula, R.J. and R.W. Ignatius. 1996. Providing controlled environments for plant growth in space. *Acta Hort*. 440:13-18.
- Cataldo D. A., M. Haroon, L. E. Schrader, and V. L. Youngs. 1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*. 6:71-80.
- Chalermpol K., K. Yoshiaki, and K. Toyoki. 1995. Rapid acclimatization of *Eucalyptus* plantlets by controlling photosynthetic photon flux density and relative humidity. *Environ Control in Biol*. 33(2): 123-132.

- Challa, H., E. Heuvelink, and U. van Meeteren. 1995. Crop growth and development. p. 62-84. In J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa, and N.J. van de Braak(ed.). Greenhouse climate control. Wageningen Press.
- Chapman, S.R. and L.P. Carter. 1976. Crop production principles and practices. Freeman, San Francisco.
- Cho, I.W., E.H. Lee, T.Y. Kim, and Y.S. Kwon. 1998. Effects of high humidity on occurrence of tomato blossom-end rot. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 39(3):247-249.
- Cho, Y.R., D.W. Hahn, and Y.B. Lee. 1998. Effect of artificial light sources on the growth of crisphead lettuce in plant factory. *J. Bio. Fac. Env.* 7(1):35-42.
- Cho, Y. R., E. J. Hahn, and Y. B. Lee. 1999. Effects of nutrient control on the growth of lettuce in nutrient film technique. *Acta Hort.* 483:161-165.
- Choi, J.H. 1997. Growth and calcium transport in tomato, cucumber and strawberry plants affected by night humidity and root zone confinement. pp107. Ph. D. Diss., Chonnam National Univ. Korea.
- Choi, K.J., G.C. Ghung, W.Y. Choi, K.P. Han, and S.K. Choi. 1995. Effect of root zone temperatures on the mineral composition of xylem sap, photosynthetic activity and transpiration in cucumber plants. *Acta Hort.* 396:161-166.
- Christensen, M.H. 1985. Water condensation on leaves. *Acta Hort.* 174:303-308.
- Chun, C. and C.A. Mitchell. 1996. Dynamic control of photosynthetic photon flux for lettuce production in CELSS. *Acta. Hort.* 440:7-12.
- Chun, C. and T. Takakura. 1994. Rate of root respiration of lettuce under various dissolved oxygen concentration in hydroponics. *Environ. Control in Biol.* 32:125-135.
- Clarkson, D.T. 1984. Calcium transport between tissues and its distribution in the plant. *Plant Cell Environ.* 7:449-456.

- Collier, G.F. and T.W. Tibbitts. 1982. Tipburn of lettuce. 54-57. In D.P. Coyne, D. Durkin, and M.W. Williams, (ed.) Hort. Rev. vol. 4.
- Collier, G.F. and V.C. Huntington. 1978. Physiological aspects of lettuce tipburn. Rpt. Natl. Res. Sta., Wellesbourne, 38-39.
- 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.
- Collier, G.F., V.C. Huntington, and E.F. Cox. 1979. A possible role for chlorogenic acid in calcium-related disorders of vegetable crops with particular reference to lettuce tipburn. *Commun. Soil Sci. & Plant Anal.* 10: 481-490.
- Cooper, A. J. 1975. Crop production in recirculating nutrient solution. *Scientia Hort.* 3:251-258.
- Corgan, J.N. and D.J. Cotter. 1971. The effects of several chemical treatments on tipburn of head lettuce. *HortScience* 6:19-20.
- Cox, E.F., J.M.T. McKee, and A.S. Dearman. 1976. The effect of growth rate in tipburn occurrence in lettuce. *J. Hort. Sci.* 51:297-309.
- Craker, L.E., and M. Seibert. 1982. Light energy requirement for controlled environment growth of lettuce and radish. *Trans. ASAE.* 25:214-216.
- Crisp, P., G.F. Collier, and T.H. Thomas. 1976. The effect of boron on tipburn and auxin activity in lettuce. *Scientia Hort.* 5:215-226.
- Dale, J.E. 1965. Leaf growth in *Phaseolus vulgaris* II. Temperature effects and the light factor. *Ann. Bot.* 29(114):932-935.
- David C.P., J.T.A. Proctor, and M.J. Tsujita. 1996. Whole-plant net CO₂ exchange of raspberry as influenced by air and root-zone temperature, CO₂ concentration, irradiation, and humidity. 1996. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121(5):838-845.

- Dellapenna, D. 1999. Nutritional genomics : Manipulating plant micronutrients to improve human health. *Science* 285 : 375-379.
- 電力中央研究所. 1993. 野菜工場の 実用技術. 農業電化協會. p37~65.
- Diatloff, E. 1994. pH-what does it really mean? *Practical Hydroponics and Greenhouses*, 7/8:17-20.
- Drew, M.C., P.S. Hole, and G.A. Picchioni. 1990. Inhibition by NaCl of net CO₂ fixation and yield of cucumber. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 115(3):472-477.
- Ehret, D.L., and Ho, L.C. 1986. Effects of osmotic potential in nutrient solution on diurnal growth of tomato fruit. *J. Exp. Bot.* 37:1297-1302.
- Enoch, H., I. Rylski and M. Spigelman. 1976. CO₂ enrichment of strawberry and cucumber plant grown in unheated greenhouses in Israel. *Scientia Hort.* 5:33-41.
- Enoch, H., I. Rylski, and Y. Samish. 1970. CO₂ enrichment to cucumbers, lettuce and sweet pepper plants grown in low plastic tunnels in a subtropical climate. *Israel J. Agr. Res.* 20:63-69.
- Faiz, S.M.A. 1983. Use of pressure bomb in the determination of soil water potential. *Plant & Soil.* 73:257-261.
- Farquhar, G.D., D.R. Dubbe and K. Raschke. 1978. Gain of the feedback loop involving carbon dioxide and stomata. Theory and measurements. *Plant Physiol.* 62:406-412.
- Farquhar, G.D, and T.D. Sharkey. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 33:317-345.
- Faust, M. and C.B. Shear. 1968. Corking disorders of apples: Physiological and biochemical review. *Bot. Rev.* 34:441-469.
- Fisher. J.C. and J.K. Muchmer. 1978. Greenhouse lettuce production. Ontario Ministry of Agr. & Food. Pub. 78-001.
- Foyer, C.M., C. Lelandais, K. Galap, and J. Kunert. 1991. Effects of elevated cytosolic glutathione reductase activity on the cellular glutathione pool and

- photosynthesis in leaves under normal and stress conditions. *Plant Physiol.* 27:863-872.
- Francois, L.E., T.J. Donovan, and E.V. Maas. 1991. Calcium deficiency of artichoke buds in relation to salinity. *HortScience* 26(5):549-553.
- 藤井信勝, 渡辺正巳, 渡邊幸雄, 嶋田典司. 1994. ホウレンソウにおけるシュウ酸生成とグリコール酸回路の関連性について. *園學雜.* 62(4) : 789-794.
- 藤田修二, 東野哲三. 1988. ハッサクコハン症の發生と果皮のアスコルビン酸及びクロロゲン酸含量との關係. *園學雜.* 57(2) : 312-318.
- Garman, P. and W.T. Mathis. 1956. Studies of mineral balance as related to occurrence of Balwin spot in connecticut. *Conn. Agr. Expt. Sta. Bull.* 601:5-19.
- Gaudreau L., J. Charbonneau, L.P. Vezina, and A Gosselin. 1995. Effects of photoperiod and photosynthetic photon flux on nitrate content and nitrate reductase activity in greenhouse-grown lettuce. *Journal of plant nutrition.* 18(3) : 437-453.
- Gebauer, G. 1990. Diurnal changes of nitrate content and nitrate reductase activity in different organs of atriplex hortensis (C₃ plant) and amaranthus retroflexus(C₄ plant). M. L.
- Gebauer, G., and Stadler, J. 1990. Nitrate assimilation and nitrate content in different organs of ash trees (*Fraxinus excelsior*). M. L. van Beusichem(Ed.), *Plant nutrition- physiology and applications.* 101~106.
- Geyer, B. 1997. 독일의 공장적 식물생산시스템의 현황 및 실용화, Institute for Horticultural Science, Humboldt University Berlin, Germany. p29~39.
- Glenn, D.M. and F. Takeda. 1989. Guttation as a technique to evaluate the water status of strawberry. *HortScience* 24:599-601.
- Goto, E. and T. Takakura. 1988. The effect of artificial light on the growth of lettuce. *Acta Hort.* 230:313-318.

- Goto, S., S. Inanaga, and K. Kumazawa. 1987. Xylem sap composition of nodulated and non-nodulated groundnut plants. *Soil sci. Plant Nutr.* 33:619-629.
- Goudriaan, J. and H.H. van Laar. 1978. Relations between leaf resistance, CO₂ concentration and CO₂ assimilation in maize, beans, lang grass and sunflower. *Photosynthetica* 12:241-249.
- Grodzinski, B. 1984. Enhancement of ethylene release from leaf tissues during glycolate decarboxylation; a possible role for photorespiration. *Plant Physiol.* 74:871-876.
- Guerrier, G. 1996. Fluxes of Na⁺, K⁺ and Cl⁻ osmotic adjustment in *Lycopersicon pimpinellitolum* and *L. esculentarm* during short- and long-term exposures to NaCl. *Physiologia Plantarum* 97:583-591.
- Guiding the development of an ecological life support system Rpt. NASA/Ames Workshop. Jan. 8-12. 1979.
- Guo, S.R. and T. Shoji. 1997. Effect of dissolved O₂ levels in a nutrient solution on the growth and mineral nutrient of tomato and cucumber seedlings. *J. Jap. Soc. Hort. Sci.* 66(2):331-337.
- Guttridge, C.G., E.G. Bradfield, and R. Holder. 1981. Dependence of calcium transport into strawberry leaves on positive pressure in the xylem. *Ann. Bot.* 47:473-480.
- Hageman R. H. and Flesher D. 1960. Nitrate reductase activity corn seedlings as affected by light and nitrate content of nutrient media. *Plant Physiology.* 4407 : 700-709.
- Hall, N.P. and A.J. Keys. 1983. Temperature dependence of the carboxylation and oxygenation of ribulose-1,5-bisphosphate in relation to effects of temperature on photosynthesis. *Plant Physiol.* 72:756-762.
- Han, E.J. 1998. The establishment of the microponic system in a plant factory by controlling optimum environment and acclimatization method for the

- mass-production of in vitro-produced chrysanthemum plantlets. Ph.D. Diss.,
The Univ. of Seoul, Seoul,
- 羽藤堅治, 稿本康. 1991. AIを用いた栽培システム(2)-NFT水耕栽培システムの診断.
生物環境調節 29(1):51~55.
- Harazono, Y., T. Taenaka, and K. Yabuki. 1984. Optimizing environmental
control of greenhouse climate for cucumber by means of 'Learning Control
Method'. Acta Hort. 148 : 259~265.
- Hashimoto, Y. 1980. Computer control of short term plant growth by
monitoring leaf temperature. Acta Hort. 106 : 139~146.
- Hayashi, M., H.C. Lee, and T. Kozai. 1993. Photoautotrophic micropropagation
of rose plantlets under CO₂ enriched conditions. J. SHITA 4(2):107-110.
- Hicklenton, P.R. and P.A. Jolliffe. 1978. Effects of greenhouse CO₂ enrichment
on the yield and photosynthetic physiology of tomato plants. Can. J. Plant
Sci. 58:801-817.
- Hideki, A., N. Hiroshige, M. Noriyoshi and H. Yasushi. 1993. Measurement of
transpiration rate, stomatal resistance and shading ratio of 'Amenity Plants'.
SHITA JOURNAL 4(2):131-138.
- Himelrick, D.G. and R.F. McDuffie. 1983. The calcium cycle: Uptake and
distribution in apple trees. HortScience 118:147-150.
- Hirohumi, S. and S. Ogata. 1987. Relationship between water use efficiency and
cuticular wax deposition in warm season forage crops grown under water
deficit conditions. Soil Sci. Plant Nutrition 33(3):439-448.
- Ho, L.C. 1989. Environmental effects on the diurnal accumulation of ⁴⁵Ca by
young fruits and leaves of tomato plants. Ann. Bot. 63:281-258.
- Ho, L.C. and D.J. Hand. 1996. Cultivar and cultural aspects of the prevention of
blossom-end rot in tomato and pepper. ISOSC Proceedings. 9th. Int. Cong.
Soilless Culture.

- Ho, L.C. and P. Adams. 1989. Effects of diurnal changes in the salinity of the nutrient solution on the accumulation of calcium by tomato fruit. *Ann. Bot.* 64:373-382.
- Ho, L. C. and P. Adams. 1995. Nutrient uptake and distribution in relation to crop quality. *Acta Hort.* 396 : 33-44.
- Hocking, P.J. 1980. The composition of phloem exudate and xylem sap from tree tobacco. *Ann. Bot.* 45: 633-643.
- Hoff, J.E., J.M. Howe, and C.A. Mitchell. 1982. Nutritional and cultural aspects of plant species for regenerative life support system. NASA Contractor Rpt. 166324.
- Hoffman, G.J. 1979. Humidity. In T.W. Tibbitts, and T.T. Kozlowski. (ed.). *Controlled environment guidelines for plant research.* Academic Press, London.
- Hohjo, M., C. Kuwata, K. Yoshikawa, and T. Ito. 1995. Effects of nitrogen form, nutrient concentration and Ca concentration on the growth, yield and fruit quality in NFT-tomato plants. *Acta Hort.* 396:145-152.
- Hong, S.H. 1990. The development of microcomputer-based environment monitoring system for automatic plant factory. MS thesis of Seoul National Univ.
- Hong, S.H. 1995. Automatic control of growth environment for plant factory. A Thesis for Doctor of Science, Seoul National Univ.
- 堀部和雄. 1993. 工場における自動化. 日本植物工場學會 SHITA REPORT. p15~22.
- 堀部和雄. 1993. 植物工場における自動化, 植物工場のシステムテクノロジ- , SHITA REPORT No.6. p13~22.
- 星岳彦. 1991. 養液管理技術-植物工場における養液栽培の展望-. 植物工場のキーテクノロジ-(SHITA REPORT No. 2). 日本植物工場學會編

- 星岳彦, 岡野利明, 關山哲雄, 高辻正基. 1994. 自動化植物工場のための植物移動システムの開発, 日本植物工場學會誌 5(2)/6(1). p15~22.
- Huber, S.C., H.H. Rogers, and F.L. Mowry. 1984. Effects of water stress on photosynthesis and carbon partitioning in soybean plants grown in field at different CO₂ level. *Plant Physiol.* 76:244-249.
- 福田直也, 宮城慎, 鈴木洋二, 池田英男, 高柳謙治. 1999. 深夜照明と培養液からの NO₃⁻除去が水耕ホウレンソウの生育と葉の汁液中NO₃⁻濃度に及ぼす影響. 園學雜. 68(1) : 146-151.
- 황호준, 류관희, 조성인, 이규철, 김기영. 1998. 퍼지제어를 이용한 양액 자동공급 시스템 개발. 한국농업기계학회지 23(4):365~372
- 養液栽培研究會全篇. 1997. 養液栽培マニュアル21. 誠文堂新光社. 東京.
- Ikeda, A., S. Nakayama, Y. Kitaya and K. Yabuki. 1988. Effect of photoperiod, CO₂ concentration, light intensity on growth and net photosynthetic rates of lettuce and turnip. *Acta Hort.* 229 : 273~282.
- Ikeda, A., Y. Tanimura, and K. Esaki. 1992. Development of plant factory using fluorescent lamps-reduction of lighting power consumption by close illumination. *J. SHITA* 3(2):111-123.
- 池田英南. 1986. 作物の營養特性からみた培養液管理. 農業および園藝. 61 : 205-211.
- 池田英男, 大澤孝也. 1980. 施用窒素形態とそ菜適應性. 日園學雜. 48(4)435~442
- Ikeda H. and T. Osawa. 1980. Comparison of adaptability to nitrogen source among vegetable crops II. Growth response and accumulation of ammonium and nitrate-nitrogen of leaf vegetables cultured in nutrient solution containing nitrate, ammonium, and nitrite as nitrogen sources. *J. Japan Soc. Hort. Sci.* 48:453-442.
- Ikeda H. and T. Osawa. 1981. Nitrate-N and ammonium-N absorption by vegetables from nutrient solution containing ammonium nitrate and the resultant change of solution pH. *J. Japan Soc. Hort. Sci.* 50:225-230.

- 今堀義洋, 周燕飛, 上田悦範, 阿部一博, 茶珍和雄. 1997. 切断傷害によるストレスがピーマン果實のアスコルビン酸代謝に及ぼす影響. 園學雜. 66(1) : 175-183.
- 今堀義洋, 周燕飛, 上田悦範, 茶珍和雄. 1998. ピーマン果實の成熟中のアスコルビン酸代謝. 園學雜. 67(5) : 789-804.
- Inoue, K., Y. Omori, S. Kondo, and H. Yokota. 1997. Effects of pH level of L-ascorbic acid solution and soaking at various growth stages on the leaf exogenous ascorbic acid content of lettuce and Japanese bunching onion. *Environ. Control in Biol.* 35(4) : 253-259.
- Inoue, K., Y. Umegaki, S. Kondo, K. Sanada, and H. Yokota. 1997. Production of iron-enriched leaf vegetables by soaking roots in ammonium ferric citrate solution : pH and iron concentration on the foliar iron content. *Envir. Cont. in Biol.* 35(1) : 55-62.
- 井上興一, 早田保義, 眞部孝明, 横田弘司, 牧田勝紘. 1993. 水耕栽培による外生L-アスコルビン酸の葉菜部への導入について. 園學雜. 62(別1) : 284-285.
- 井上興一, 杉本和昭, 近藤悟, 早田保義, 横田弘司. 1996. 浸漬法による外生L-アスコルビン酸のレタスおよび葉ネギへの導入. 園學雜. 65(3) : 537-543.
- 井上興一, 田島佳苗, 眞田和明, 横田弘司. 1995a. 浸漬処理による鐵高含量葉菜類の生産法について. *日本土壤肥料學雜誌* 66(5) : 527-534.
- 井上興一, 田島佳苗, 横田弘司, 眞部孝明, 早田保義, 牧田勝紘. 1995b. 水耕栽培を利用した鐵高含量葉菜類の生産法について. *日本土壤肥料學雜誌* 65(4) : 436-440.
- 井上興一, 横田弘司, 牧田勝紘. 1995c. 水耕法による外生L-アスコルビン酸ナトリウムのサラダナへの導入. 園學雜. 63(4) : 779-785.
- 石井現相, 西條了康. 1987. 栽培條件がダイコンの全糖及びビタミンC含量, β -アミラーゼ活性に及ぼす影響. 園學雜. 55(4) : 468-475.
- Ito, T. 1989. More intensive production of lettuce under artificially controlled conditions. *Acta Hort.* 260:381-389.
- 伊東正 1986. 植物の工場的生産への實踐的アプローチ. *農業および園藝* 61:174-180
- 泉秀實, 伊東貞爾, 吉田保治. 1988. 生育時におけるカンキツ果皮中のアスコルビン酸

- 含量と糖含量との關係. 園學雜. 57(2) : 304-311.
- 泉秀實, 伊東貞爾, 吉田保治. 1990a. ウンシュウミカンの陽葉と陰葉のアスコルビン酸, 糖及びクロロフィル含量の季節變動とその成分相互間の關係. 園學雜. 59(2) : 389-397.
- 泉秀實, 伊東貞爾, 吉田保治. 1990b. 樹冠内・外層の着果位置別にみたウンシュウミカン果實の發育中における糖とアスコルビン酸含量について. 園學雜. 58(4) : 877-883.
- Izumi, H. T. Ito, and Y. Yoshida. 1992. Effect of light intensity during the growing period on ascorbic acid content and its histochemical distribution in the leaves and peel, and fruit quality of Satsuma Mandarin. J. Japan Soc. Hort. Sci. 61(1) : 7-15.
- Jackson, M. B. 1980. Aeration in the nutrient film technique of glasshouse crop production and the importance of oxygen, ethylene and carbon dioxide. Acta Hort. 98 : 61~78.
- 장유섭. 1998. 작물이동식 자동주간조절장치, 특허출원자료.
- Jensen, M. H. and W. L. Collins. 1985. Hydroponic vegetable production. Hort. Rev. 7 : 483~558.
- 지성환, 한규상, 1994. 정식후 초기 20일간의 질소농도가 수경토마토의 영양생장 및 과실수량에 미치는 영향. 한원지 35(5):415~420.
- Jin, J.Y. 1993. Development of CO₂ concentration control algorithm considering CO₂ consumption rate. MS thesis of Seoul National Univ.
- Jones, H. G. and F. Tardieu. 1998. Modelling water relations of horticultural crops: a review. Sci. Hort. 74:21-46.
- Jones, J. W., E. Dayan, L.H. Allen, Jr., H. van Keulen, and H. Challa. 1991. A dynamic tomato growth and yield model(TOMGRO). Transactions of the ASAE. 34(2) : 663~672.
- Jones, P., J.W. Jones, and L.H. Allen, Jr. 1984. Carbon dioxide effects on photosynthesis and transpiration during vegetative growth in soybeans. Soil

- Crop Sci. Soc. Fla. Proc.
- Jones, P., J.W. Jones, L.H. Allen, Jr., and J.W. Mishoe. 1984. Dynamic computer control of closed environmental plant growth chambers. Design and verification. Transactions of the ASAE. 27 : 879~888.
- 정갑채, 하순호, 이성희 1992. 오이의 건강진단에 관한 연구. I. 특정요소의 결핍에 따른 분석치의 비교. 한원지 33(5):365~371.
- 정순주, 장흥기. 1998. 차세대 식물생산시스템. 전남대학출판부. 197~214.
- Kader, A.A., W.J. Lipton, and L.L. Morris. 1973. Systems for scoring quality of harvested lettuce. Hortscience. 8:408-409.
- Kaiser, J.J. and O. A. M. Lewis. Nitrate reductase and glutamine synthetase activity in leaves and roots of nitrate-fed helianthus annuus l.
- Kamachi, K., T. Yamaya, T. Mae, and K. Ojima. 1991. A role for glutamine synthetase in the remobilization of leaf nitrogen during natural senescence in rice leaves. Plant Physiol. 96, 411~417.
- Kent, L.H. and A. Lauchli. 1985. Germination and seedling growth of cotton: Salinity -calcium interaction. Plant, Cell and Environ. 10:559-564.
- 김병운, 이병일, 김기덕. 1987. 미나리의 실생번식법에 관한 연구. I. 미나리의 개화 습성, 종자구조 및 발육과정. 서울대학교 농학연구. 12:15-20.
- 김흥기, 이정현, 이범선, 정순주, 1995. 양액재배방식과 배양액의 종류가 상추의 생장에 미치는 영향. 한원지 36(2): 151-157.
- 김형준, 우영희, 남윤일, 권영삼. 1988. 양액 자동공급 장치 개발. 한국생물생산시설 환경학회 학술논문발표요지 7(1):83~88.
- 김진아, 이병일. 1998. 미나리 체세포배의 안정적 생산과 bioreactor를 이용한 대량 생산. 서울대 석사학위논문.
- Kim, Y.J. 1993. Development of artificial light system for fully controlled plant growth system. MS thesis of Seoul National Univ.
- Kimbell, B.A. 1983. Carbon dioxide and agricultural yield : An assemblage and analysis of 430 prior observations. Agron. J. 75 : 779~788.

- Kimbell, M.H., W.L. Sims, and J.E. Welch. 1967. Plant climate analysis for lettuce. *California Agriculture*. 21(4):2-4.
- Kinght, L.S. and C.A. Mitchell. 1983. Stimulation of lettuce productivity by manipulation of diurnal temperature and light. *Hortscience*. 18(4):462-463.
- Kirkby, E.A. and D.J. Pilbeam. 1984. Calcium as a plant nutrient. *Plant, Cell and Environ.* 7:397-405.
- Koontz, H.V., R.P. Prince, and R.F. Koontz. 1987. Comparison of fluorescent and high pressure sodium lamps on growth of leaf lettuce. *HortScience*. 22:424-425
- Kopsell, D.A. and W.M. Randle. 1997. Selenate concentration affects selenium and sulfur uptake and accumulation by 'Granex 33' onions. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 122(5) : 721-726.
- Kozai, T., A. Karino, K.G. Grato, and H.O. Ikeda. 1992. p. 117-122. *New greenhouse management*. Askura. Japan.
- Kramer, D. 1984. Cytological aspects of salt tolerance in higher plant. p. 3-16. In R.C. Staples, and G.H. Toenniessen. (eds.). *Salinity tolerance in plants*. John Wiley & Sons. Inc. Toronto.
- Kubota, C., K. Fujiwara, Y. Kitaya, and T. Kozai. 1997. Recent advances in environment control in micropropagation. p. 153-169. In E. Goto. et al. (ed.). *Plant production in closed ecosystems*. Kluwer. Academic Publishers, The Netherlands.
- Kwon, Y.S. 1996. Actual state and development strategies on cultivation technology of factory style production in Korea. p. 75-89. In: *J. Bio. Fac. Env(ed.) International Symposium on practical plant factories toward the 21th century*. Korean Society for Biological Production Facilities & Environment Control.
- 권영삼, 김광용, 박상근, 고관달. 1988. 공정생산에 의한 상추연속시험. '98년도 원예연구소 시험연구보고서, p147~187.

- Lachance, P.A. 1998. Overview of key nutrients : Micronutrient aspects. Nutrition Reviews 56(4) : S34-S39.
- Lau, O.L. and S.F. Yang. 1975. Interaction of kinetin and calcium in relation to their effect on stimulation of ethylene production. Plant Physiol. 55:738-740.
- Lechno, S., E. Zamski, and E. Telor. 1997. Salt stress-induced responses in cucumber plant. J. Plant Physiol. 150:206-211.
- Lee, C.C. 1990. Fuzzy logic in control system: Fuzzy logic controller. ITTEE Trans Syst., Man. Cybern. 20:404-418.
- 이준구, 이병일. 1998. 폐쇄순환식 양액재배에 있어서 양액의 조성 및 농도에 따른 미나리의 생육 및 양수분 흡수특성. 서울대 석사학위논문.
- 이규철, 류관희, 이정훈, 김기영, 황호준. 1997. 액체 정밀계량 장치를 이용한 양액 자동조제 시스템 개발. 한국농업기계학회지 22(4):469~478.
- Lee, K.C., K.H. Ryu, S.H. Noh, and S.H. Hong. 1992. Development of fully -controlled phytotron-Temperature and humidity control system. J. of Korean Society for Agricultural Machinery. 17(4): 344-353.
- 이용호, 이병일. 1991. 미나리의 수경재배체계 개발에 관한 기초연구. II. 양액조건이 수경 미나리의 무기 양분 흡수와 수량에 미치는 영향. 한원지. 32:29-42.
- 이용호, 이병일. 1997. 수경 상추와 미나리의 체내 NO_3^- 함량 저하 및 질소동화계 효소의 활성에 관한 연구. 서울대 박사학위논문.
- 이용범. 1988. 새로운 양액재배용 배지 암면(Rock wool)의 특성과 이용. 시설원에 연구 1:75~87.
- Lee, Y.B. 1991. Effect of long-term CO_2 enrichment on growth, mineral nutrient uptake, RuBp carboxylase activity, and photosynthesis of tomato(*Lycopersicum esculentum* Mill). Ph D thesis of Seoul National Univ.
- 이용범. 1997. 양액재배용 배지. 양액재배 연구. 3(2):14~48.
- Lee, Y.D. and T. Takakura. 1995. Root cooling for spinach in deep hydroponic culture under high air temperature conditions. Acta. Hort. 399:121-126.
- Lemon, E.R. 1983. CO_2 and plants : the response of plants to rising levels of

- atmospheric carbon dioxide. AAAS Selected Symp. 84. AAAS, Washington, DC.
- Lewis, T.L., D. Martin, J. Cerny, and D.A. Ratkowsky. 1977. The effects of a sheltered environment on the mineral element composition of Merton Worcester apple fruits and leaves and on the incidence of bitter pit at harvest. *HortScience* 52:401-407.
- 류관희. 1993. 생력화와 경쟁력 제고를 위한 시설원예의 자동화 방향. "국내 시설원예산업 발전을 위한 심포지엄" 발표논문집. 서울대학교 농업개발연구소.
- Malmstrom, C.M. and C.B. Field. 1997. Virus-induced differences in the response of oat plant to elevated carbon dioxide plant. *Plant Cell and Environ.* 20:178-188.
- Mankin, K. R. and R. P. Fynn. 1996. Nutrient uptake response of New Guinea impatiens to light, temperature, and nutrient solution concentration. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121(5):826-830.
- Marcelis, L. F. M., E. Heuvelink, and J. Goudriaan. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Sci. Hort.* 74:83-111.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. p. 99-105. Academic press. London.
- Marsh, L.S. 1987. A model of greenhouse hydroponic lettuce production: Daily selection of optimum air temperature and comparison of green house cover. Ph. D. diss. Cornell Univ., Ithaca, N.Y.
- 丸尾 達. 1997. 北歐型植物生産システム, ハイドロポニックス. 1997(1). p3~8.
- Masamoto, T. 1992. The law of diminishing utility and the optimization principle of plant factories. *SHITA JOURNAL* 4(1): 6-9.
- Mason, G.F. and C.G. Guttridge. 1974. The role of calcium, boron, and some divalent ions in leaf tipburn of strawberry. *Sciencia Hort.* 2:299-308.
- Mason, R.M. and J.L. Carden. 1979. Guiding the development of a controlled ecological life support system Rpt. NASA/Ames Workshop. Jan. p. 8-12

- Maynard D. N., A. V. Barker, P. L. Minotti and N. H. Peck. 1976. Nitrate accumulation in vegetables. *Advances in Agronomy*. 28:71-118.
- Meiri, A. and Z. Plaut. 1985. Crop production and management under saline conditions. *Plant Soil* 89:253-271.
- Mertz, W. M. D. 1997. Food Fortification in the United States. *Nutrition Reviews* 55(2) : 44-49.
- 三橋庸良. 1993. 植物工場の自動化. 日本植物工場學會 SHITA REPORT. p45~57.
- Misaghi, I.J. and R.G. Grogan. 1978a. Effect of temperature on tipburn development in head lettuce. *Phytopathology* 68:1738-1743.
- Misaghi, I.J. and R.G. Grogan. 1978b. Physiological basis for tipburn development in head lettuce. *Phytopathology* 68:1744-1753.
- Misaghi, I.J., N.F. Obeker, and R.B. Hine. 1992. Prevention of tipburn in iceberg lettuce during postharvest storage. *Plant Disease* 76:1169-1171.
- Miyazima, D. 1994. Effects of concentration of nutrient solution, plant size at harvest, and light condition before harvest on the ascorbic acid and sugar concentrations in leaves of hydroponically grown Komatsuna(*Brassica campestris* L. rapifera group). *J. Japan Soc. Hort. Sci.* 63(3) : 567-574.
- Monje, O. and B. Bugbee. 1996. Characterizing photosynthesis and transpiration of plant communities controlled environments. *Acta. Hort.* 440:123-128.
- 문보흠, 이병일. 1996. 수경재배 미나리의 체내 질산태질소 수준저하 방법과 품질에 관한 연구. 서울대 석사학위논문.
- Moorby, J. and C.J. Graves. 1980. Root and air temperature effects on growth and yield of tomatoes and lettuce. *Acta. Hort.* 98:28-43.
- Morgan, L. 1999. Hydroponic lettuce production. p. 31-41. Casper Publications Pty Ltd., Australia.
- 森本哲夫, 1995. 養液制御. 生物環境調節ハンドブック. 日本生物環境調節學會編.
- 森邦 男. 1991. 自動化技術, 植物工場のシステムテクノロジ, SHITA REPORT No.2. p16~24.

- Mozafar, A. 1993. Nitrogen fertilizers and the amount of vitamins in plants : A review. J. Plant Nutri. 16(2) : 2479-2506.
- Namiki, R.Y. 1981. Problems affecting hydroponics. III. Dissolved oxygen concentration, temperature, nutrient management. Agriculture and Horticulture 56:1212-1216
- Neuman, D.S. and B.A. Smit. 1991. The influence of leaf water status and ABA on leaf growth and stomata of *Phaseolus* seedlings with hypoxic roots. J. Exp. Bot. 42:1499-1506.
- Nonami, H., K. Kiyama, and Y. Hashimoto. 1991a. Nutrient solution management for growth regulation for plant seedlings cultivated in plant factories. J. SHITA 3(1):1-6.
- Nonami, H., T. Fukuyama, I.W. Cho, and Y. Hashimoto. 1991b. Improvement of tomato fruit production by nutrient supply management in greenhouses. Proc. IFAC/ISHS 1st Workshop in Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture 413-418.
- Nonami, H., T. Fukuyama, M. Yamamoto, L. Yang, and Y. Hashimoto. 1995. Blossom-end rot of tomato plants may not be directly caused by calcium deficiency. Acta Hort. 396:107-114.
- 糠谷明. 1992. 野菜の養液栽培における培養液管理. 高品質生産のための培養液管理. 農耕と園藝. 48 : 86-89.
- Nukaya, A., K. Goto, H. Jang, A. Kano, and K. Ohkawa. 1995. Effect of K/Ca ratio in the nutrient solution on incidence of blossom-end rot and gold specks of tomato fruit grown in rockwool. Acta Hort. 396:123-130.
- 小倉東一. 次世代植物工場への新展開-植物工場普及の現状と課題. SHITA REPORT No. 14. p15~23.
- 오길근, 류관희, 홍순호, 김효중. 1995. 원칩 마이크로 컴퓨터를 이용한 양액 자동 조제 장치의 개발. 한국농업기계학회지 20(4):383~389.
- Okano, T., T. Hoshi, and H. Terazoe. 1988. Development of hydroponic system

- and adaptation of microcomputers for a commercial size vegetable factory. *Acta Hort.* 230:343-378.
- 王秀峰, 伊東正. 1997a. 水耕ホウレンソの生育, 收量, 葉中NO₃含量に及ぼす補給液の窒酸態窒素制限とカリウム増與の影響. *園學雜.* 67(1) : 74-80.
- 王秀峰, 伊東正. 1997b. 水耕ホウレンソの生育, 收量およびNO₃含量に及ぼす補給液のNO₃-Nの影響. *園學雜.* 66(2) : 313-319.
- Palzkill, D.A. and T.W. Tibbitts. 1977. Evidence that root pressure flow is required for calcium transport to headleaves of cabbage. *Plant Physiol.* 60:854-856.
- Palzkill, D.A., T.W. Tibbitts, and E. Struckmeyer. 1980. High relative humidity promotes tipburn on young cabbage plant. *HortScience* 15:659-660.
- Palzkill, D.A. and T.W. Tibbitts, and P.H. Williams. 1976. Enhancement of calcium transport to inner leaves and cabbage for prevention of tipburn. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 101:645-648.
- 박권우. 1986. 서양채소론. 고려대학교 출판부. p263-271.
- 박권우. 1997. 공장형 원예산업 시대의 개막과 전망 II, - 국내외 식물공장의 현황과 장래-, 호남작물연구소주관 제4회 국제공동세미나 자료집. p8~25.
- 박권우, 이용범, 최남용, 정진철. 1990. 배지 및 양액의 차이가 오이와 토마토의 수량과 품질에 미치는 영향. *한국환경학회지* 9:143~151.
- 박권우, 신영주, 이용범. 엽채류의 환경제어 모델 연구, II. 인공광 조건에 따른 식물의 생육변화. 1992. *생물생산시설환경.* 1(2):135~141.
- Park. K.W., Y.J. Shin, and Y.B. Lee. 1992. Studies on the modelling of controlled environment in leaf vegetable crops. II Effects of various light sources on the growth. *J. Bio. Fac. Env.* 1(2):135-141.
- 박권우, 김영식. 1991. 수경재배의 이론과 실제. 고려대학교 출판부. p30-97.
- Park, K.W. and Y.S. Kim. 1998. *Hydroponics in Horticulture.* p. 273-297. Academic Press, Seoul.

- Pate, J.S. and P.J. Hocking. 1978. Phloem and xylem transport in the supply of minerals to a developing legume fruit. *Ann. Bot.* 42: 911-921.
- Peet, M.M. and D.H. Willits. 1982. The effect of density and postplanting fertilization on response of lettuce to CO₂ enrichment. *HortScience* 17(6):948-949.
- Peter, R.H. 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.
- Porter, M.A. and B. Grodzinski. 1984. Acclimation to high CO₂ in bean. Carbonic anhydrase and RuBP carboxylase. *Plant Physiol.* 74:413-417.
- Premuzic, Z. M. Bargiela, A. Garcia, A. Rendina, and A. Iorio. 1998. Calcium, iron, potassium, phosphorous, and vitamin C content of organic and hydroponic tomatoes. *Hortsci.* 33(2) : 255-257.
- Rao, I.M., R.E. Sharp, and J.S. Boyer. 1987. Leaf magnesium alters photo-synthetic response to low water potentials in sunflower. *Plant Physiol.* 84:1214-1219.
- Raz, V. and R. Fluhr. 1992. Calcium requirement for ethylene dependent responses. *The Plant Cell*, 4:1123-1130.
- Resh, H.M. 1981. *Hydroponics food production*, Woodcridge Press Pub. Co.
- Rice, E.L. 1974. *Allelopathy*. Academic Press, New York.
- Rijck, G. de and E. Schrevens. 1995. Application of mixture-theory for the optimisation of the composition of the nutrient solution. *Acta Hort.* 401:283-291.
- Rijck, G. de and E. Schrevens. 1998. Multifactorial optimisation of the nutrient solution for hydroponically grown chicory plants. *Sci. Hort.* 76:149-159.
- Rogers, H.H., G.E. Bingham, J.D. Cure, J.M. Smith, and G.E. Bingham. 1984. Influence of elevated CO₂ on water relations of soybeans. *Plant Physiol.* 74:233-238.

- Rogers, H.H., G.E. Bingham, J.D. Cure, J.M. Smith, and K.A. Surano. 1983. Response of selected plant species to elevated carbon dioxide in the field. *J. Environ. Qual.* 12:569-574.
- 농촌진흥청 농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법-토양·식물체·토양미생물. Pp. 450. 수원.
- Ruthner, E. 1981. High efficient plant radiation within Ruthner crop production system. *Acta Hort.* 128:197-202.
- Ryder, E.J. 1979. Leafy salad vegetables. Avi, Westport, Connecticut.
- Ryder, E.J. and T.W. Whitaker. 1980. The lettuce industry in California. 193-194. In Janic, J. *Hort. Rev.* vol 2. AVI Publishing Company INC.
- Ryuh, K.H. 1994. On-line measurement and control of plant growth Korea science foundation.
- Saito, T., A. Tani, M. Kiyota, M. Ohe, and H. Sato. 1996. Rates of ethylene release photosynthesis and transpiration of rice measured in closed-type chamber. *Acta Hort.* 440:55-59.
- Sakaki, T., N. Kondo, and K. Sugahara. 1983. Breakdown of photosynthetic pigments and lipids in spinach leaves with ozone fumigation: role of active oxygens. *Physiol. Plant*, 59:28-34.
- Santamaria, P. and A. Elia. 1997. Producing nitrate-free endive heads : Effect of nitrogen form on growth, yield, and ion composition of endive. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 122(1) : 140-145.
- Schrevens, E. and J. Cornell. 1993. Design and analysis of mixture systems: Applications in hydroponic, plant nutrition research. *Plant and Soil* 154:45-52.
- Schwarz, D. and R. Kuchenbuch. 1998. Water uptake by tomato plants grown in closed hydroponic systems dependent on the EC-level. *Acta. Hort.* 458:323-328.
- Schwarz, M. 1995a. Soilless culture management. Israel Univ. Press. p147-150.

- Schwarz, M. 1995b. Soilless culture management. p. 98-102. In B.L. McNeal, F. Tardieu, H. Van Keulen, and D. Van Velck (ed.). 1st ed. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Seginer, I., G. Shina, L. Albright, and L. Marsh. 1991. Optimal setpoints for greenhouse lettuce. *J. Agr. Eng. Res.* 49(3):209-226.
- 關谷敬三. 1996. 農産物に含まれる健康機能性成分の検索と評価. *農業および園藝* 71(7) : 743-749.
- Sharon, L.K. and C.A. Mitchell. 1983. Enhancement of lettuce yield by manipulation of light and nitrogen nutrition. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 112(6):932-935.
- Shear, C.B. 1975. Calcium-related disorders of fruits and vegetables. *HortScience* 10:361-365.
- Shibata, T., K. Iwao, and T. Takano. 1993. Development of an automatic plant growth management system by image processing. *Environ. Control in Biol.* 31(1):29-36.
- Shim, K.D., K.H. Ryu, S.H. Noh, and S.H. Hong. 1992. Development of fully-controlled plant growth system(Ⅱ)- An integrated control system- J. of Korean Society for Agricultural Machinery. 17(4): 344-353.
- Shimizu, H., Y. Fujinuma, and K. Omasa. 1996. Effects of carbon dioxides and/or relative humidity on the growth and the transpiration of several plants. *Acta Hort.* 440:175-180.
- 篠原温. 1992. 野菜の養液栽培における培養液管理. 培養液の濃度管理. *農耕と園藝*. 42 : 94-97.
- Shinohara, Y. and Y. Suzuki. 1981. Effects of light and nutritional conditions on the ascorbic acid content of lettuce. *J. Japan Soc. Hort. Sci.* 50(2) : 239-246.
- Shintani, D. and D. Dellapenna. 1998. Elevating the vitamin E content of plants through metabolic engineering. *Science* 282 : 2098-2100.

- 植物榮養實驗法編集委員會. 1990. 植物榮養實驗法. Pp. 488. 博友社. 東京.
- Sim, M.Y. 1999. Effect of root environment control on the growth and quality of lettuce in hydroponics. pp 41. MS. The Univ. of Seoul. Seoul.
- 清水浩. 1996. 画像処理による植物生長解析. SHITA REPORT No.11. 日本植物工場學會. p64~75.
- Smirnoff, N. and S.V. Colombe. 1988. Drought influences the activity of enzymes of the chloroplast hydrogen peroxide scavenging system. J. Exp. Bot. 39:1097-1108.
- Smith. I.K., T.L. Vierheller, and C.A. Thome. 1989. Properties and function of glutathione reductase in plant. Physiol. Plant 77:449.
- Smith, T.A. 1973. Amine levels in mineral deficient *Hordeum vulgare* leaves. Phytochemistry 12:2093-2100.
- Soffer, H. and D. W. Burger. 1988a. Effect of dissolved oxygen concentrations in aero-hydroponics on formation and growth of adventitious roots in *Ficus benjamina* L. and *Chrysanthemum morifolium* Tzvelev cuttings. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 113 : 218~221.
- Soffer, H. and D. W. Burger. 1988b. Studies on plant propagation using the aero-hydroponic method. Acta Hort. 230 : 261~269.
- Sonneveld, C. and W. Voogt. 1991. Effects of Ca-stress on blossom-end rot Mg-deficiency in rookwool grown tomato. Acta Hort. 294:81-88.
- Sonneveld, I. C. and N. Straver. 1992. Nutrient solution for vegetables and flowers grown in water or substrates. Voedingsoplossingen glastuinbouw(8 edition). p9.
- Starkey, N.G. 1985. The effect of secondary glazing and fixed screens on green house environment and crop response of tomatoes. Acta Hort. 174:331-340.
- Stebbins, R.L. and D.H. Dewey. 1972. Role of transpiration and phloem transport in accumulation of ⁴⁵Ca in leaves of young apple trees. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 97:471-475.

- Strain, B.R. and T.V. Armentano. 1980. Environmental and societal consequences of CO₂ induced climate changes: response of "unmanaged" ecosystems. Natl. Tech. Inform. Ser., U.S. Dept. of Commerce, Springfield, Virginia.
- Stratton, M.L. and R.T. Nagata. 1994. Preliminary determination of parameters to develop an objective procedure for assessing tipburn in lettuce. Florida State Hort. Soc. 106:157-159.
- Suto, K. and T. Ando. 1975. Influence of atmospheric humidity and soil moisture contents on the plant water condition as well as on the growth of sweet pepper and tomato plants. Bullentin of the Vegetable Ornamental Crops Research Station. Ishinden-Ogoso. Japan. Series. A. 2. 49-63.
- 鈴木芳夫. 1985. 野菜の養液栽培における培養液管理. 培養液管理-組成と濃度. p 25-30.
- Takanobu, S., I. Kenzo. and T. Taikichi. 1993a. Analysis of factory production of plant and growth measurement. SHITA JOURNAL 5(1):39-43.
- Takanobu, S., I. Kenzo, and T. Taikichi. 1993b. Development of an automatic growth measurement system by image processing. Environ. Control in Biol 31:29-36.
- 高德錠. 1993. 動態浮根式水耕系統之開發與利用. 臺灣省臺中區農業改良場.
- 高辻正基. 1993. 完全制御型植物工場の經濟性の分析. 植物工場學會誌. 4(2) : 111~117.
- 高辻正基. 1996. 植物工場の基礎と實濟, 裳華房. p135~139.
- 高辻正基. 1997. 植物工場ハンドブック. 東海大學出版會. p87~128.
- Takatsuji, M. 1993. Analysis of a growth model for a plant factory. J. SHITA. 4(2):118-122.
- 建部雅子, 石原俊幸, 石井かおる, 米山忠克. 1995. 培地の窒素形態およびCa:K比がホウレンソウとコマツナの窒素, アスコルビン酸, シュウ酸含有率に與える影響. 日本土壤肥料學雜誌 66(5) : 535-543.

- 田村晃. 1999. 寡日射条件における低温処理がコマツナ(*Brassica campestris* L.)の糖およびアスコルビン酸含有率に及ぼす影響. 園學雜. 68(2) : 409-413.
- Tani, A. 1997. Studies of trace gases, especially ethylene in plant cultivation facilities in controlled ecological life support systems. J. SHITA. 35(4):293.
- Tantau, H.J. 1993. Optimal control for plant production in greenhouses. 139-152. In Y. Hashimoto, Y. et al. (ed.). The Computerized Greenhouse. Academic Press. San Diego.
- Terry, N., C. Carlson, T. K. Raab, and A. M. Zayed. 1992. Rates of selenium volatilization among crop species. J. Envir. Qual. 21 : 341-344.
- Thompson, H.C., R.W. Langhans, A. Both, and L.D. Albridght. 1998. Shoot and root temperature effects on lettuce growth in a floating hydroponic system. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 123(3):361-364.
- Tibbitts, T.W., B.E. Struckmeyer, and R.R. Rao. 1965. Tipburn of lettuce as related to release of latex. Proc. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 86:462-467.
- Tibbitts, T.W., D.A. Palzkill. 1979. Requirement for root pressure flow to provide adequate calcium for low transpiring tissues. Commun. Soil Sci. & Plant Anal. 10:251-257.
- Tibbitts, T.W., D.A. Palzkill, and E. Struckmeyer. 1980. High relative humidity promotes tipburn on young cabbage plant. HortScience 15:659-660.
- Tibbitts. T.W., D.C. Morgan, and I.J. Warrington. 1983. Growth of lettuce, spinach, mustard, and wheat plants under four combinations of high-pressure sodium, metal halide and tungsten halogen lamps at equal PPF. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 108:622-630.
- Tibbitts, T.W. and G.E. Bottenberg. 1971. Effects of temperature increase in tipburn injury of lettuce. HortScience 6:306.
- Tibbitts, T.W., J. Bensink, F. Kuipers, and J. Hobe. 1985. Association of latex pressure with tipburn injury of lettuce J. Am. Soc. Hort. Sci. 110:362-365.

- Tibbitts, T.W. and M. Read. 1976. Rate of metabolite accumulation into latex of lettuce and proposed association with tipburn injury. J. Amer. Soc. Sci. 101:406-409.
- Tibbitts, T.W. and R.R. Rao. 1968. Light intensity and duration in the development of lettuce tipburn. Proc. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 93:454-461.
- Tohur, U., M. Ttetsuo, and H. Yasushi. 1994. Growth optimization of spinach plants in plant growth using intelligent control. SHITA JOURNAL 6(3):203-208.
- Toru, U., N. Yoshikazu, and S. Tadashi. 1991. Studies on measurement of bioelectric potential of intact plant for the environmental control. SHITA JOURNAL 3(1):7-16.
- Valle, R., J.W. Mishoe, J.W. Jones, and L.H. Allen, Jr. 1985. Transpiration rate and water use efficiency of soybean leaves adapted to different CO₂ environments. Crop Science. 25:477-482.
- Van de Sanden, P.A.C.M., 1985. Effect of air humidity on growth and gas exchange of cucumber seedlings Acta Hort. 174:259-268.
- Van den E., J.P. Koornneef, and C. Sonneveld. 1975. Osmotic pressure of the soil solution: Determination and effects on some glasshouse crops. Neth. J. Agr. Sci. 23:181-190.
- Van der Boon, J. 1980. Prediction and control of bitter pot in apples. J. Hort. Sci. 55:307-312.
- Van Goor, B.J. 1968. The role of calcium and cell permeability in the disease blossom-end rot of tomatoes. Physiol. Plant 21:1110-1121.
- Van Os, E.A., R.P.van Zuijdam, A.T.M/Hendrix, and V.J.M. Koch.. 1993. A moving fruit vegetable crop, Acta Horticulturae 342. p69~76.
- Wang, M. and I.L, Goldman. 1996. Red beet (*Beta vulgaris*) inbred lines and plant introductions differ in root folic acid content. Acta Hort. 426 : 273-276.

- Watada, A.E. 1995. Methods for determining quality of fruits and vegetables. *Acta Hort.* 379 : 559-567.
- 輪竹宏昭. 1995. 養液栽培用マルチイオンメータ. *アグリビジネス Vol10(42)*. システム農業.
- Whitaker, T.W., E.J. Ryder, V.E. Rubatsky, and P.A. Vail. 1974. Lettuce production in the United States. United States Department of Agriculture: Washington., D. C., Agriculture Handbook No. 221.
- Wiebe, H.J. 1981. Effect of water quantity on physiological disorders and quality of plants. *Acta Hort.* 119:67-76.
- Wiebe, H.J., H.P. Schaltzler, and W. Kuhn. 1977. On the movement and distribution of calcium in white cabbage in dependence of the water status. *Plant & Soil*, 48:409-416.
- Wien, H.C. 1998. *Vegetable Crop Physiology*. CAB International.
- William, B.M. and R.W. Langhans. 1985. Growth and productivity of 'Grand Rapids' lettuce in diurnally fluctuating temperatures and day/night average temperatures. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 110(4):560-565.
- Willumsen, J. 1984. Nutritional requirements of lettuce in water culture. p. 771-779. ISOC. *Soilless Culture. Proc. 6th Intl. Congr. Soilless Culture*, Luntern.
- Wittwer, S.H. and S. Honma. 1979. Greenhouse tomatoes, lettuce and cucumbers. Michigan state Univ. Press.
- Wolfe, D.W. 1991. Low temperature effects on early vegetative growth, leaf gas exchange and water potential of chilling-sensitive and chilling-tolerant crop species. *Ann. Bot.* 67:205-212.
- Wong, S.C. 1980. Effects of elevated partial pressure of CO₂ on the rate of CO₂ assimilation and water use efficiency in plants. p. 159-166. In: G.I. Peraman (ed.) *Carbon dioxide and climate; Australian research*(G.I. Pearman, Australian Academy of Science, Canberra, Australia.

- Woo, K.C. and S.C. Wong. 1983. Inhibition of CO₂ assimilation by supraoptimal CO₂: effect of light and temperature. *Austral. J. Plant Physiol.* 10:75-85.
- 内田 徹. 植物工場新技術の展開. p24~30
- 宇田川雄二. 1992. 野菜の養液栽培における培養液管理. 培養液の交換とイオン濃度管理. *農耕と園藝*. 43 : p94-97.
- 牛島忠廣, 古川昭雄, 米山忠克. 1981. 植物の生産過程測定法. Pp. 202. 共立出版株式会社. 東京.
- Wurr, D.C.E., J.R. Fellows, and A.J. Hambridge. 1992. Environmental factors influencing head density and diameter of crisp lettuce cv. Saladin. *HortScience* 67(3):395-401.
- Wurr, D.C.E., J.R. Fellows, and K. Phelps. 1996. Investigating trends in vegetable crop response to increasing temperature associated with climate change. *Scientia Horticulturae*. 66: 255-263.
- 山崎肯哉. 1981. 養液栽培の現状と問題点(1). 養液栽培(水耕)における培養液管理. *農業および園藝*. 56(4) : 73-78.
- 山崎肯哉. 1982. 養液栽培全篇. 博友社. 東京.
- 山崎弘郎, 橋本康, 道居徹. 1996. インテリジェント農業—自動化・知能化のすすめ—. 計測自動制御學會. p192~203.
- 山鳥田典司. 1989. 培地のK, Ca, Mgのバランスと植物の生長. 博友社. p55-84.
- Yanagi, A.A., R.M. Bullock, and J.J. Cho. 1983. Factors involved in the development of tipburn in crisphead lettuce in Hawaii. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 108(2):234-237.
- Yanagi, T., K. Okamoto, and S. Takita. 1996. Effects of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. *Acta Hort.* 440:117-122.
- Yang, S.F. 1985. Biosynthesis and action of ethylene. *HortScience* 20:41-45.
- Yang, S.F. and N.E. Hoffman. 1984. Ethylene biosynthesis and its regulation in higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 35:159-189.

- Yang, S.K., W.S. Kim, H.W. Kim, and G.C. Chung. 1996. Effect of Ca/K ratio in nutrient solution on the early growth and the mineral composition in the xylem sap and plant of pepper. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 37(5):622-626.
- 양원모 1993. 호남지역 양액재배의 발전 전망과 기술적 대응 호남시설원예연구소 1:69-92.
- Yoshida, S., M. Kitano, and H. Eguchi. 1996. Growth analysis of cucumber plants under control of dissolved O₂ concentration in hydroponics. *Environ. Control in Biol.* 34(3):223-229.
- 吉田重方, 前坂昌宏, 長友武志, 中尾宏人, 松尾邦昭, 城戸澄子. 1998. ビタミンB₁₂エンリッチ野菜の生産についての一考察. *農業および園藝* 73(8) : 903-909.
- Yoshiko, Mizushima. 1998 Effect of carbon dioxide on an optimized design of the plant factory. *Journal of Society of High Technology in Agriculture.* 10(1): 5-9.
- Yun, J.H 1996. Status of automatization in protected horticultural facilities and prospect of plant factory in Korea. p. 91-115. In: J. Bio. Fac. Env(ed.) International Symposium on practical plant factories toward the 21th century. Korean Society for Biological Production Facilities & Environment Control.
- Zapata, S. and D. Jean-Pierre. 1992. Ascorbic, dehydroascorbic and isoascorbic acid simultaneous determinations by reverse phase ion interaction HPLC. *J. Food Science* 57(2) : 506-511.