

講 座

植物工場－未來의 都市農業

Plant Factory - A Prospective Urban Agriculture

孫 禎 翼

서울대학교 農業生命科學大學 農工學科

I. 서 론

최근 작물의 공장적 재배는 「식물공장」이라는 단어로 대표되는, 새로운 재배방식의 하나로서 세계적으로 주목받고 있다. 식물공장(plant factory or factory-style plant production system)이라는 단어의 의미와 같이 「시설내의 작물을 공장제품의 생산과 동일하게 재배하는 시스템」이다. 즉 자연환경에 의존하지 않고 인공환경하에서 작물을 공장적으로 재배하는 방식을 의미한다. 이를 위해서는 지하부의 양액, 지상부의 온습도, 탄산가스, 광 등에 대한 고도의 환경제어 및 작업의 자동화가 필요하다.

지하부의 배양액은 공장적 재배에 필수불가결한 부분이다. 실제의 양액재배에서도 토양재배에 비하여 여러가지 장점을 가지고 있다. 양액관리를 위한 장치의 개선과 적용작물의 선택, 생력관리기술이 확정되었고, 연작장애대책, 안정적 계획생산, 무공해식품의 평가가 높기 때문에, 양액재배면적은 점점 증가하는 추세이다.

원래, 작물생산에 인공조명이 등장한 배경은, 태양광의 부족이나 변동을 보충하기 위한 것이었지만 최근 식물공장적 재배에는 고속대량생산을 위한 인공조명이 사용되고 있다. 그러나 공장적 재배는 많은 장점을 갖고 있지만 아직 연구단계에 있다고 해도 과언이 아니다. 실용적 규모로서 생산가능한 단계에 도달하기까지는 해결해야만 문제가 많이 산재되어 있다.

그 문제중에서 기본적으로 인공광 사용에 따른 전기대를 둘러싼 경제성 문제와 고속생산에 기인하는 작물의 생리장애 문제이다. 이외에도 에너지 절약을 위하여 자연광을 이용한 식물공장도 연구 단계를 거쳐 실용화되고 있는 실정이다.

농업의 발전과정을 공간적인 측면에서 고찰하면, 전통적으로 농촌의 농업 형태가 존재하였고, 그와 더불어 도시와 농촌의 중간에 위치하는 도시근교 농업 형태가 시간적인 흐름과 함께 발전하여 왔다. 또한 현재 도시와 공존하는 도시농업 형태의 발전이 서서히 진행되고 있고, 이러한 전통적인 방법과 첨단적인 방법에 의한 농업생산방법은 장래 농업의 균형적 발전을 위하여 공존해 나가야 할 것이라고 사료된다.

II. 식물공장의 기초

1. 식물공장의 개념

식물공장에 따른 작물생산이라는 것은 환경제어 기기등을 사용하여,

- 1) 공정의 규격화를 수행하고,
- 2) 성장을 촉진시켜 대량생산을 가능하게 하는 기초적 기술에 근거를 두지 않으면 안된다. 그 개념은 그림1과 같다.

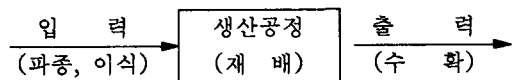


그림 1. 식물공장의 기본적 개념²⁰⁾

2. 식물공장의 형태

식물공장의 형태는 다양하지만 가장 기본적으로 그림 2 와 같은 형태를 갖추고 있다. 먼저 생육조건 차이에 의한 재배실과 육묘실로 구분되어 있고, 각각의 장소에 광합성을 위한 인공광원 및

탄산가스공급기, 공기조화를 위한 냉난방기 및 가습기, 작물재배를 위한 재배베드, 배양액공급을 위한 농축배양액 및 배양액탱크등이 설치되어 있다. 이외에도 컴퓨터에 의한 환경제어장치 및 작업의 자동화 장치등이 추가될 수 있다. 그림 3 은 苗의 이식작업의 예를 나타낸다.

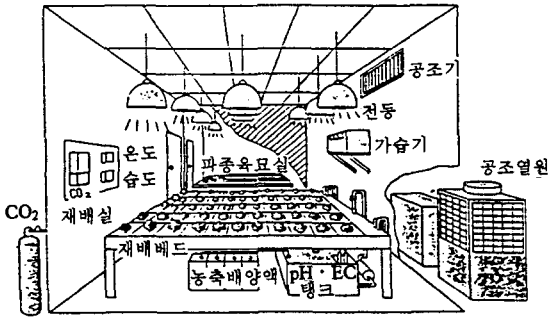


그림 2. 완전제어방식 식물공장¹⁾

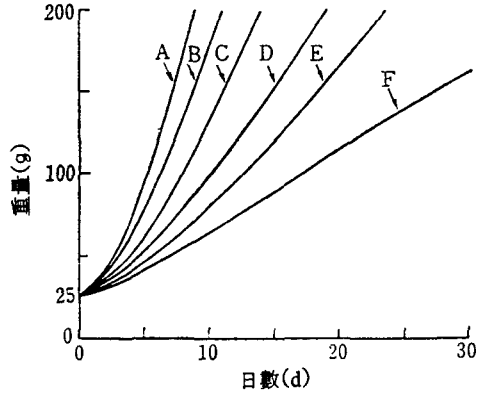


그림 3. Spacing 로봇 - 苗의 이식작업(미쯔비 시 중공업)¹⁵⁾

3. 식물공장의 생산성

식물공장의 기본조건에서 처럼 광합성조건 개선에 의한 성장촉진에 의하여 성장속도를 변화시킬 수 있다. 광합성에 관련된 환경요인으로는 일장, 광강도, 탄산가스농도, 온습도, 배양액농도 등을 들 수 있다. 그림 4 는 상추의 성장과 환경요인과의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 처럼 일장이 길수록, 탄산가스농도가 높을수록 생체중의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 또한 광강도가 포화상태로 접근할수록 성장속도가 커진다. 따라서 환경요인과의

성장속도의 관계를 이용하여 식물생산량에 관한 정량화가 가능하다.



	A	B	C	D	E	F
일 장(시간)	24		12			
탄산가스농도(ppm)	1000	400	1200	400		
기온(=액온)(℃)	20			26		14
상대습도(%)	80 - 85					
조도(klx)	18					
양액 EC(mS/cm)	1.1 - 1.3					
양액 pH	5.8 - 6.8					

그림 4. 상추의 성장과 환경²¹⁾

III. 식물공장의 특징

1. 장 점

- 1) 시간 및 공간에 관계없이 생산이 가능하다.
- 2) 좁은 토지에서 대량생산이 가능하다.
- 3) 주년재배가 가능하고 계획생산이 가능하다.
- 4) 재현성 있는 생산이 가능하다.
- 5) 환경제어에 의한 고속생산 및 고품질 작물의 공급이 가능하다.
- 6) 무농약, 무공해에 따른 청정작물의 생산이 가능하다.
- 7) 수경재배방식에 의한 연작장애가 없다.
- 8) 작업의 자동화 및 환경제어에 따른 생력재배가 가능하다.
- 9) 도시근교, 빌딩의 옥상등에 설치함으로써 인 간생활환경이 개선된다.

2. 단 점

- 1) 초기투자비 및 유지비가 많이 든다.
- 2) 수경재배방식이므로 병 발생시 작물전체에

오염될 가능성이 있다.

- 3) 양액의 완충능력이 작기 때문에 양액관리가 까다롭다.
- 4) 경제성을 위한 고부가가치 작물의 도입이 필요하다.
- 5) 에너지의 경제성에 위배된다.

3. 필요조건

- 1) 지상부 환경제어 : 가능한 균일, 고품질의 작물을 생산하기 위하여 각종 지상부 환경(온도, 습도, 탄산가스, 광,…)의 제어가 필요하다.
- 2) 지하부 환경제어 : 토경에서는 제어 불가능한 토양(배지)환경(pH, EC, 용존산소,…)을 양액을 사용하면 제어가 가능하다.
- 3) 작업의 자동화 : 작업의 생력화를 위하여 육묘, 정식, 재배, 수확 등의 일부 또는 전체의 자동화가 필요하다.

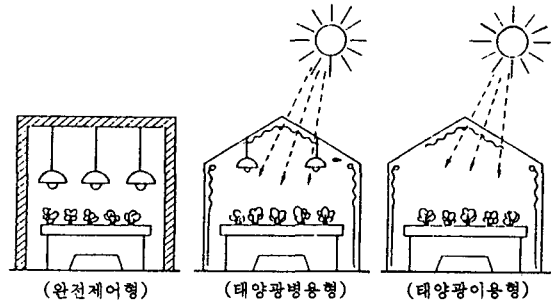


그림5. 식물공장의 종류⁵⁾

IV. 식물공장의 분류

1. 광원 종류

- 1) 태양광이용형 : 자연광에 의존하는 일반적인 온실형으로서 광환경의 변동이 있지만 초기 투자 및 유지비가 저렴한 장점이 있다.
- 2) 태양광병용형 : 태양광의 부족한 부분을 인공광으로 보완하는 중간형태로서, 저렴한 유지비로 인공광의 이용효과에 근접시켜 균일품질의 생산을 목표로 하고 있다.
- 3) 인공광이용형 : 가장 제어하기 어려운 광의 강도 및 방향까지 일정하게 제어할 수 있기 때문에 대부분의 환경요인을 임의로 조절할 수 있는 완전제어형이다. 광원은 다른 광원에 비하여 경제성이 높은 고압나트륨(HPS) 램프를 사용하는 경향이 많다. 기타, 광섬유를 이용하여 인공광원으로서 태양광을 이용하는 형태도 연구되고 있다. 그림 5 는 광원의 종류에 따른 식물공장의 전형적인 형태를 나타내고 있다.

2. 재배상 형태

- 1) 평면식 : 일반적인 재배방식으로서 재배상이 평면상태이다.

- 2) 입체식 : 집약적 생산은 물론 광입사 효율을 높이기 위하여 재배상의 구조가 목적에 부합되는 입체적인 상태이다.

3. 재배상 장소

- 1) 고정식 : 모든 작업형태가 생육단계에 관계없이 일정장소에서 고정적으로 재배하는 형태
- 2) 이동식 : 생육단계별 정식간격 및 환경조건이 상이하기 때문에 자동적으로 작물을 이동시키면서 재배하는 형태
(육묘 → 정식 → 재배 → 수확 단계)

4. 자동화 수준

- 1) 환경제어 : 생육환경에 관련된 각종 환경요인 및 관련기기를 자동적으로 제어하는 형태
- 2) 작업의 자동화 : 육묘, 정식, 재배, 수확 단계까지 일부 또는 전체 작업을 자동화하는 형태

V. 식물공장에 필요한 기술

1. 공통부분

- 1) 시스템설계
- 2) 수경재배기술
- 3) 이동재배기술
- 4) 밀식재배기술
- 5) 파종, 육묘, 재배, 수확등의 자동화

2. 완전제어형

- 1) 광원과 조명설계

- 2) 최적공조설계
- 3) 단열재의 선정

3. 태양광이용형

- 1) 컴퓨터를 이용한 최적 환경제어기술
- 2) 최적 광환경을 위한 피복재 개발

VI. 식물생육과 환경요인과의 관계

그림 6 은 공장적 재배에 따른 환경요인과 최종목표와의 관계를 나타내고 있다. 실선은 직접적인 관계, 점선은 간접적인 관계를 나타낸다. 양액에는 pH, EC, 용존산소가 포함되어 있다. 경제성 부분에서는 광(인공광)과 온도(냉방)가 가장 큰 요인이고 생리장애 부분에서는 역시 광과 온습도가 중요한 요인으로 작용한다. 각 환경요인에 대한 상세한 설명은 다음과 같다.

1. 지상부환경

- 1) 온·습도
- 2) 탄산가스
- 3) 광스펙트럼

2. 지하부환경

- 1) pH
- 2) 양액농도(EC)
- 3) 용존산소

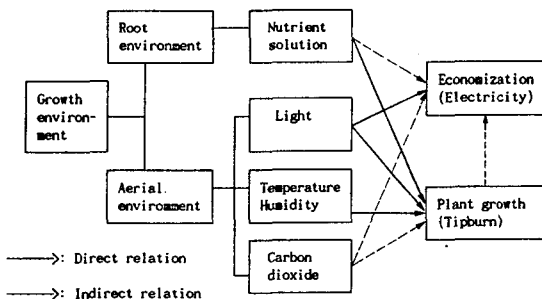


그림6. 식물공장의 목표와 환경요인과의 관계¹³⁾

VII. 양액재배시스템

1. 양액재배의 개념

양액재배 (nutriculture, hydroponics)는 토양을 사

용하지 않고 양분, 수분 만으로 작물을 재배하는 방법으로 무토(양)재배 (soilless culture)라고 한다. 이는 작물이 생육하는데 필요한 무기원소를 적당한 비율로 용해시킨 수용액에서 작물을 재배하는 형태를 말한다. 기본적인 방식은 그림 7 과 같다.

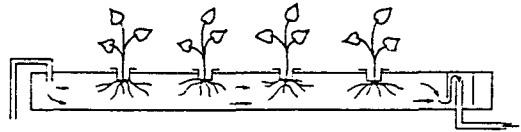


그림 7. 양액재배시스템의 기본예

2. 양액재배의 분류

작물이 뿌리를 지지하는 방법과 양분이나 수분 또는 산소를 공급하는 방법에 따라 분무경(aeroponics), 분무수경(aerohydroponics), 수경(water culture), 고형배지경(aggregate culture)등의 여러가지 방식이 개발되어 있다. 양액재배에 있어서 뿌리환경은 매우 단순하며 정밀한 계측, 제어 및 관리가 가능하여 영속적으로 높은 재현성을 지니고 있어 이제 양액재배는 식물공장의 필수조건이다.

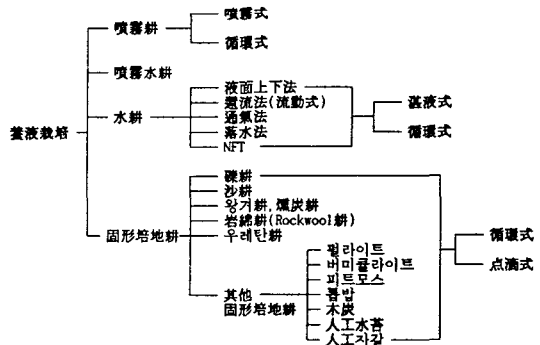


그림 8. 양액재배의 분류⁵⁾

3. 양액재배 시스템의 종류

1) 시스템의 구분

기본적인 시스템의 구분은 순환식과 비순환식으로 대별된다. 순환식이란 양액을 순환시키면서 부족분을 공급하는 형태이고, 비순환식은 기본적인 양액재배의 분류에 따라서 방법이 다소 차이는 있다. 분무경에서는 분무식, 수경에서는 담액식, 고형배지경에서는 점적식으로 구별된다.

2) 양액제어방법

- (1) 타이머 제어 : 시간경과에 따라서 제어하는 방법
- (2) ON-OFF 제어 : 설정치에 준해서 제어기를 on-off 시키는 방법
- (3) PID 제어 : 편차(동작신호)의 비례치, 적분치, 미분치를 고려하여 조작 량을 결정하는 방법
- (4) 적응(Adaptive) 제어 : 상황에 따라 제어 상수를 변화시키는 방법.

예) PID 제어에서 비례상수 K를 부하량의 상승의 요인에 따라 변화 시킴

- 기타 : 퍼지제어, 인공지능 방법을 사용한 각종 제어방법

3) 제어대상

- (1) pH(수소이온농도지수 : $pH = \log_{10}[H^+]$)

pH에 관해서는 작물의 생육에 직접영향을 주기 때문에 일찌기 부터 자동제어가 사용되었다. 작물에 따라 적정범위가 다소 차이는 있지만 일반적으로 pH 5.5~6.5 정도로 제어를 한다.

- (2) 전기전도도(Electric conductivity : EC (mS/cm))

양액중에 용해되어 있는 전해질(염, 산, 알칼리)의 종합적인 농도를 나타내는 대표치로서 전기전도도를 사용한다. 개략적이기 때문에 정밀제어상에 많은문제를 수반하지만 간단하기 때문에 많이 사용된다. 일반적으로 1.0~2.0 mS/cm 범위에서 많이 사용한다.

- (3) 용존산소(Dissolved oxygen : DO)

용존산소는 양액중에 용해된 산소의 농도를 말하고 식물의 양분흡수에 원동력으로 사용된다. 온도가 증가하면 반비례적으로 감소한다. 즉, 10, 15, 20, 25, 30, 35(℃) : 11.3, 10.2, 9.2, 8.4, 7.6, 6.7(ppm)이다.

- (4) 이온(Ion)

일반적으로 양액의 EC는 물리화학적 특성이 다른 각 이온의 EC의 합으로 나타나기 때문에 양액중의 각 이온의 균형을 무시하고 EC를 일정하게 유지하여도 양액의 조성을 일정하게 제어할 수 없다. 결국 시간의 경과와 함께 이온의 균형이 깨어져 필요한 이온이 감소하게 된다. 따라서 양액내용의 균형을 이루기 위하여 이온제어가 필요하

게 되었다. 대부분의 이온에 대한 전극(electrode)은 개발되어 있지만 실용성이 없기 때문에 연구단계이다.

VIII. 광 조명시스템

완전제어형의 경우, 間歇조명등에 의한 전기대의 절약, 병용형의 경우는 냉난방에 소모되는 비용의 절약이 중요한 내용이 된다.

1. 조명방식

- 1) 간헐조명 : 명기와 암기를 설정하여 투입에너지에 대한 생산량의 비를 계산하여 효율성을 추구하는 방법으로 펄스수준에서의 Duty ratio(點打시간/1주기시간)로 부터 일장시간의 조절을 시도한다.
- 2) 연속조명 : 연속적인 광조건에서 최대의 생산량을 추구하는 방법

2. 인공광에 의한 보광

1) 방 법

보광 : 자연광의 부족분을 인공광으로 보충
 용도 : 소면적 광합성 보광(육묘), 일장조절, 인공기상실용, 식물공장

2) 작물재배용 인공광원의 종류

- 백열등(incandicent lamp) : 청자색이 없기 때문에 비효율적 이다. (조합 필요)
- 형광등(fluorescent lamp) : 대부분이 청색광이고 효율적인 재배용 광원이다.(조합 필요)
- 고압수은등(high pressure mercury vapor lamp) : 강도가 높고 원적외부 분이 적지만 효율적이다. (조합 필요)
- 크세논(xenon lamp) : 가시광선대에서 태양 스펙트럼과 유사하고 PAR부분에서 태양광보다 상대강도가 크기 때문에 효율이 아주 높다. 특수연구용으로 사용됨.
- 메탈할라이드(metal halide lamp) : 가시광선대가 태양스펙트럼과 유사하기 때문에 효율이 높다.
- 고압나트륨(high pressure sodium lamp) : 적색광부분이 많지만 가장 경제성이 뛰어나고 효율이 높다.

※ 광원의 특징에 관한 세부사항은 생략한다.

3) 최적 조명시스템의 개발

- (1) 광원의 스펙트럼 : 광합성대상작물의 광합성 작용스펙트럼에 일치하는 광원을 개발함으로써 광합성의 효율을 극대화한다.
- (2) 광원의 경제성 : 투입 전기대에 대한 생산물의 비가 최대가 되는 광원을 개발하여 경제성을 극대화한다.

(4) 탄산가스 : 포화농도까지 증가

(5) 배양액농도 : 적정농도에서 유리

(6) 광주기 : 주기에 무관

2) Ca이동량

(1) 상대습도 : 주·야간의 포차가 클수록 유리

(2) 수분포텐셜 : 수분포텐셜이 높을수록(양액농도가 낮을수록 유리)

(3) 칼슘 : 양액중의 농도가 높을 수록 유리

IX. 생리장애 문제

식물공장내에서의 생육은 보통의 노지나 온실재배와는 달라서 여러종류의 생육장애를 수반하는 것이 알려져 있다. 식물공장과 같은 고속생산시스템의 경우, 팁번(tipburn : 心腐敗) 현상은 중요한 생리장애 문제중의 하나이다. 그 매카니즘은 완전히 규명되지 않고 있지만, Ca부족에 의한 성장점부근의 어린 세포의 기계적인 파괴에 의하여 성장점부근의 어린잎이 갈변되면서 생육이 정지하는 현상으로 상품가치를 떨어뜨리는 주요 요인이다. 각종 환경요인과 발생 현상에 관한 정성적인 부분은 많은 실험에 의하여 밝혀져 있다.

1. 발생 매카니즘

일반적으로 광합성속도의 증가에 의한 광합성산물의 급속한 증가에 의하여 성장점 부근의 어린 세포내의 팽압이 세포벽의 저항력보다 커짐으로 세포가 기계적으로 파괴되는 것에 따른 결과라고 보고되어 있다(그림 9). 따라서,

- 1) 세포내의 팽압증가(주간의 광합성산물의 증가)에 기여하는 환경요인이 많을 수록 발생 가능성이 높다.
- 2) 세포벽의 지지력강화(야간의 Ca이동량의 증가)에 기여하는 환경요인이 많을 수록 발생 가능성이 낮다.
- 3) 세포내의 팽압이 세포벽의 지지력 보다 클 경우에 발생한다.

2. 주요 관계요인

- 1) 광합성속도(전류량)
 - (1) 온도 : 생육적정온도에서 유리
 - (2) 상대습도 : 생육적정습도에서 유리
 - (3) 광강도 : 포화강도까지 증가

3. 환경공학적 접근

상기의 환경조건 및 그 영향을 고려하여 환경조절공학적인 차원에서 제거가능한 부분은 정밀하게 제어할 필요가 있다.

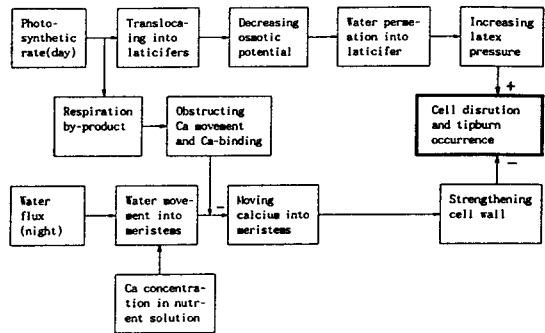


그림 9. Tipburn 발생과 환경요인과의 관계¹³⁾

X. 실용화 단계의 식물공장의 예

1. 미 국

- 1) Foittaka : 태양광이용형, 평면고정방식, 상추 재배
- 2) Artcherdaniel-midland : 완전제어형, 파종 - 수확 자동화, 상추 재배
- 3) Agronotics : 태양광병용형, 육묘의 완전제어, 생육 태양광이용
- 4) Phytfarm of America : 완전제어형, 평면이동방식, 상추, 시금치 재배
- 5) Agrisystem : 태양광이용형, 평면고정방식, 상추재배

6) 기타 : 연구단계를 포함 5개 정도

의 변화가 있으리라고 생각된다.

2. 일 본

- 1) 電力中央研究所 : 태양광병용형, 평면고정방식, 상추, 시금치 재배
- 2) タイマー : 완전제어형, 평면고정방식, 상추 재배, 산지작매
- 3) 三浦農園 : 완전제어형, 평면고정방식, 상추 재배
- 4) 横河電機 : 태양광이용형, 평면고정방식, 미니 토마토 재배
- 5) キューピーブリジストン : 완전제어형, 입체 고정방식, 상추를 포함한 엽채류 재배
- 6) M式水耕研究所 : 태양광이용형, 입체고정방식, 토마토, 미나리 재배
- 7) 金子種苗 : 태양광이용형, 평면고정방식, 각종 야채재배
- 8) 기타 : 연구단계를 포함 10개 정도

3. 기 타

- 1) Christensen(덴마크) : 태양광이용형, 평면 이동방식, 크레슨 재배
- 2) Okamoto農園(캐나다) : 완전제어형, 평면 고정방식, 상추재배
- 3) Abese(스웨덴) : 태양광병용형, 평면이동방식, 상추재배
- 4) 기타 : 연구단계를 포함 2개 정도

4. 한 국

- 1) 흥농종묘 : 태양광이용형, 육묘에 한정(육묘 공장)
 - 2) 기타 : 연구단계 포함 2개 정도
- ※ 이상의 자료는 변경될 수 있음.

XI. 결 론

식물공장에 관한 연구는, 1) 환경제어적 접근에 의한 생산성 향상, 2) 경제성의 향상을 위하여 생산량/투자비(전기)의 극대화, 3) 작업의 자동화에 의한 생력화, 4) 식물공장내의 환경과 작물과의 관계, 5) 육종학적 접근에 의하여 식물공장에 적합한 작물의 개발 등이 대두되어 왔고, 이외에도 지역특성 및 시대적 상화에 따라서 다소 필요성

XII. 참고문헌

- 1) 朴權瑀, 金永植. 1990. 水耕栽培의 理論과 實際. 高大出版部.
- 2) 孫禎翼. 1992. 園藝施設의 自動化를 위한 컴퓨터의 利用. 農業과 情報技術 Vol. 1(2) : 6-12.
- 3) 孫禎翼, 金文基. 1992. 養液栽培를 위한 培養液 管理 支援시스템의 開發. (1) 培養液의 配合 및 電氣傳導度(EC)의 豫測. 生物生産施設環境 Vol. 1(1) : 52-60.
- 4) 孫禎翼, 金文基, 南相運. 1992. 養液栽培를 위한 培養液管理 支援시스템의 開發. (2) 神經回路 網에 의한 電氣傳導度(EC)의 推定. 生物生産 施設環境 Vol. 1(2) : 162-168.
- 5) 李昞駟 외 14. 1992. 新制 施設園藝學. 郷文社.
- 6) Cooper, A, J. 1979. The ABC of NFT. Grower books.
- 7) Hashimoto, Y. and W. Day. 1991. Mathematical and control applications in agriculture and horticulture. IFAC.
- 8) Howard, M. R. 1978. Hydroponic food production. Woodbridge press publishing company.
- 9) Kutata, K and T. Kozai. 1992. Transplant production systems. Kluwer Academic Publishers.
- 10) Nelson, P. V. 1991. Greenhouse operation management(4th ed.). Prentice hall.
- 11) Son, J. E. and T. Takakura. 1987. A study on automatic control of nutrient solutions in hydroponics. J. Agr. Met. Vol. 43(2) : 147-151.
- 12) Son, J. E. and T. Takakura. 1988. Effect of EC of nutrient solution and light condition on transpiration and tipburn injury of lettuce in a plant factory. J. Agr. Met. Vol. 44(4) : 253-258.
- 13) Son, J. E. 1988. A study on environmental control in factory-style production of lettuce. PhD thesis. University of Tokyo.
- 14) Son, J. E. and T. Okuya. 1991. Prediction of electrical conductivity of nutrient solution in hydroponics. J. Agr. Met. Vol. 47(3) : 159-163.
- 15) 日本農業氣象學會. 1985. 植物工場의 現狀과 將來.

- 16) 日本植物工場學會. 1992. ハイテク農業ハンドブック. 東海大學出版部.
- 17) 生物の科學-遺傳. 1987. 野菜工場. 裝華房.
- 18) 生物の科學-遺傳. 1984. 水耕栽培. 裝華房.
- 19) 日本施設園藝協會. 1986. 植物工場のすべて. 富民協會
- 20) 高十正基. 1982. 植物工場の基礎と實際. 技術情報センター.
- 21) 高十正基. 1986. 野菜工場. 丸善株式會社.
- 22) 山崎肯哉. 1981. 養液栽培全篇. 博友社.
- 23) 養賢堂. 1986. 養液栽培の新技術. 養賢堂.

학 회 광 고

한국생물생산시설환경학회에서는 본 학회지인 “生物生産施設環境”에 광고게재를 희망하는 업체를 아래와 같이 접수하고 있사오니 많은 참여를 부탁드립니다.

- 아 래 -

1. 광고 접수: 수시접수(제2권 제2호에 게재할 광고는 10월 31일까지)
2. 문의처: 본 학회 사무국