



식물공장

PLANT FACTORY

식물공장은 지역이나 기후 조건에 상관없이 작물이 자라는 데 필요한 환경을 최적으로 만들어 연중 농산물을 계획 생산할 수 있는 새로운 형태의 농업기술로서 미래 농업을 이끌어 갈 차세대 농업생산기반이라고 할 수 있다.



농어촌살리기
법국민운동본부

식물공장

식물공장

펴낸날 2018년 12월 28일 개정2판 1쇄 발행

발행인 농촌진흥청장 김경규

총괄기획 농촌진흥청 농촌지원국장 김상남

농촌진흥청 기술보급과 유승오, 백영목, 김기형, 김창수, 한승희, 김소영, 차은정

편집기획 국립농업과학원장 이용범

국립농업과학원 생산자동화기계과 최규홍, 이공인, 김동억

국립농업과학원 기술지원팀 심근섭, 김원태, 장시연, 김진오

발행처 농촌진흥청 063-238-0975

ISBN 978-89-480-5583-2 95520

978-89-480-3525-4(세트)

편집디자인 내일날씨 02-334-1215

농업기술길잡이

식물공장



식물공장 개요

1. 식물공장의 필요성 / 08
2. 식물공장의 개념 / 10
3. 식물공장의 구분 / 15
4. 국내·외 식물공장 현황 / 21
5. 발전과정 / 24
6. 향후 발전방향 및 전망 / 26

제1장

인공광 식물공장

1. 개요 / 34
2. 종류와 특징 / 36
3. 광원 및 조명 / 41
4. 공기조화 / 65
5. 자동화 / 79
6. 환경제어 / 96
7. 수경재배 / 126

제2장

식물공장

식물공장은 시설원예의 발전된 형태로 재배기술에 자동화, 로봇화, 전기전자, 제어 기술 등이 융합된 차세대 농업기술로서 농업의 경쟁력 제고와 새로운 시장창출이 기대된다.

CONTENTS

제3장

자연광 식물공장

1. 개요 / 154
2. 종류와 특징 / 156
3. 광원 / 163
4. 냉·난방 / 171
5. 자동화 / 179
6. 환경제어 / 196
7. 수경재배 / 214

제4장

식물공장 사례

1. 국내 / 228
2. 해외 / 237

제1장

식물공장 개요

[illegible]



1. 식물공장의 필요성
2. 식물공장의 개념
3. 식물공장의 구분
4. 국내·외 식물공장 현황
5. 발전과정
6. 향후 발전방향 및 전망



식물공장은 작물재배기술에 자동화, 빛(광) 제어, IT 등 첨단기술을 융·복합한 차세대 농업기술이다. 농업의 경쟁력을 높일 수 있는 농업생산기술인 식물공장은 1950년대 유럽에서부터 처음으로 시작되었으며, 최근 우리나라에서도 식물공장에 대한 연구개발이 한창이다.

1 식물공장의 필요성

최근 기상이변 등 농업환경의 악화와 미래 농업기술 수요에 대응하기 위한 방안으로 식물공장이 주목을 받고 있다. 식물공장은 지역이나 기후조건에 상관없이 작물이 자라는데 필요한 환경을 최적으로 만들어 연중 농산물을 계획 생산할 수 있는 새로운 형태의 농업기술로서 미래 농업을 이끌어갈 차세대 농업생산기반이라고 할 수 있다.

식물공장이 필요한 이유는 첫째, 인구 증가, 농경지 감소 등에 따른 식량부족을 해결하기 위해 단위면적당 생산성을 획기적으로 증대시킬 수 있기 때문이다. 작물을 생산할 수 있는 농경지는 도시화, 사막화, 토양침식 등으로 매년 줄어들고 있으며, 대기 및 지하수 등 지구환경의 오염과 이상기후의 영향으로 농산물 생산이 점차 불안정하게 되어 미래에 올 수 있는 식량부족의 대응방안을 마련해야 한다. 식물공장에서 재배되는 작물은 최적의 환경에서 재배되므로 작물 생장속도를 높여 생육기간이 단축되며, 수확량도 높일 수 있다. 특히 연중 작물생산이 가능하므로 토지생산성을 획기적으로 높일 수 있는 장점을 지니고 있다.

둘째, 고품질 안전 농산물의 지속 생산이 가능하고 소비자의 요구 및 기호에 부응할 수 있다. 최근 국민소득과 생활수준의 향상에 따라 농산물에 대한 수요자의 요구가 품질, 맛, 안전성, 기호성 등으로 다양화되었다. 식물공장은 고품질의 식물을 연중 계획적으로 생산할 수 있기 때문에 수급의 안정을 도모할 수 있을 뿐만 아니라 소비자의 요구를 충족시켜 주는 대안이다.

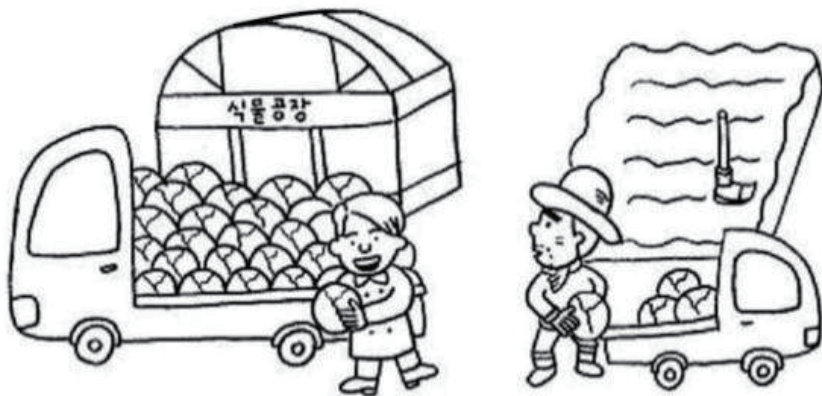
셋째, 작업공정이 자동화된 쾌적한 환경조건에서 쉽고 편하게 작물을 생산할 수 있어 **노동생산성¹⁾**을 높일 수 있다. 농업인구의 감소와 더불어 고령화, 부녀화가 심화되면서 농촌 노동력은 질적, 양적으로 떨어지고 있다. 또한 열악한 작업환경에서 힘든 노동을 해야 하고, 일한 시간에 비해 노동생산성이 상대적으로 낮아 청장년들은 농업을 꺼림에 따라 후계자가 절대적으로 부족한 실정이다.



식물공장은 각종 자동화장치, 로봇 등이 도입되어 편하게 작업할 수 있으므로 미래형 농업의 한 형태인 동시에 농업을 매력이 있는 산업으로 변화시킬 수 있는 대안이 된다.

〈식물공장의 필요성〉

- ① 단위면적당 생산성의 획기적 증대
- ② 농산물의 지속적 안정생산 및 소비자의 수요와 기호에 부응
- ③ 편한 농작업 구현과 노동생산성 향상



Tip.

v1 노동생산성

노동의 능률, 들인 노동량과 그 결과로 얻어진 생산량과의 비율을 말한다.

2 식물공장의 개념

정의

농업생산은 노지재배 → 비닐하우스 → 유리온실 → 식물공장의 순으로 고도화되면서 발전하고 있다.

식물공장은 작물 재배기술에 자동화, 빛(광) 제어, IT 등 첨단 기술을 융·복합한 차세대 농업기술로서, 고품질 안전 농산물의 연중 계획생산을 통해 농업의 경쟁력을 높이고 새로운 성장동력의 창출을 기대할 수 있다.

식물공장이란 ‘환경조절을 통해서 작물의 **주년생산**^{v1}과 계획생산이 가능하며 작물의 수량과 품질을 조절할 수 있는 공장형 식물생산시스템’을 의미한다. 즉 통제된 시설 내부의 온도, 빛(광), 이산화탄소(CO₂) 농도, 배양액 등 작물 재배 환경조건을 인위적으로 최적의 상태로 제어하여 계절이나 장소에 구애받지 않고 안전하고 부가가치가 높은 작물을 연중 계획 생산이 가능하도록 한 새로운 개념의 농법이다.



노지재배



비닐하우스



유리온실



자연광 식물공장



인공광 식물공장

〈그림 1-1〉 농업생산의 변화

Tip.

v1 주년생산

한 해에 몇 번이고 심어 생산하는 것

핵심기술 및 기대효과

식물공장의 핵심기술은 'P.L.A.N.T' 로 정리할 수 있다.

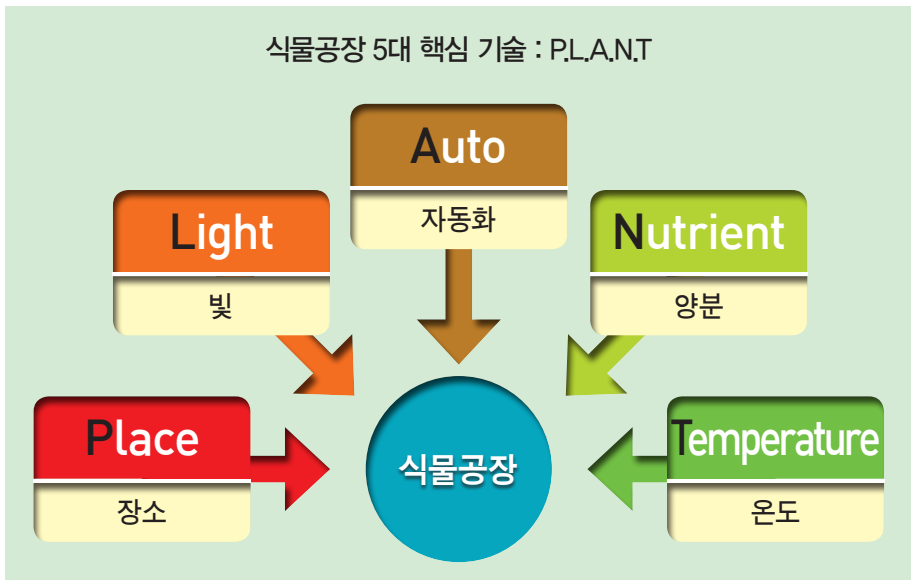
Place(장소) : 사막이나 바다, 극지 등 환경에 구애받지 않고 어디에서나 건설이 가능해 장소의 한계를 극복할 수 있다.

Light(빛) : 음극선관 형광등, 고압나트륨, LED 등 다양한 광원을 이용하여 작물의 광합성과 생육을 조절할 수 있다.

Auto(자동화) : 각종 자동화 기술과 로봇화, 원격제어 등으로 씨뿌리기(파종)부터 거두기(수확)까지 자동화가 가능하다.

Nutrient(양분) : 식물 생장에 적합한 양분을 공급하여 품질을 높이고 기능성분을 강화할 수 있다.

Temperature(온도) : 온도를 조절하여 열대에서 온대까지 다양한 식물을 재배하고 생육 속도와 거두는 시기(수확기)를 조절할 수 있다.



(그림 1-2) 식물공장의 핵심기술(RDA 인테러뱅 10호, 2011년)

식물공장을 통해 얻을 수 있는 기대효과 'F.A.C.T.O.R.Y' 는 다음과 같다.

Fresh(신선 농산물) : 주문생산 및 계획생산을 통해 신선한 농산물을 얻을 수 있다.

Agri-biz(농산업 확대) : IT, BT 산업과의 융·복합을 통하여 새로운 시장창출이 가능하다.

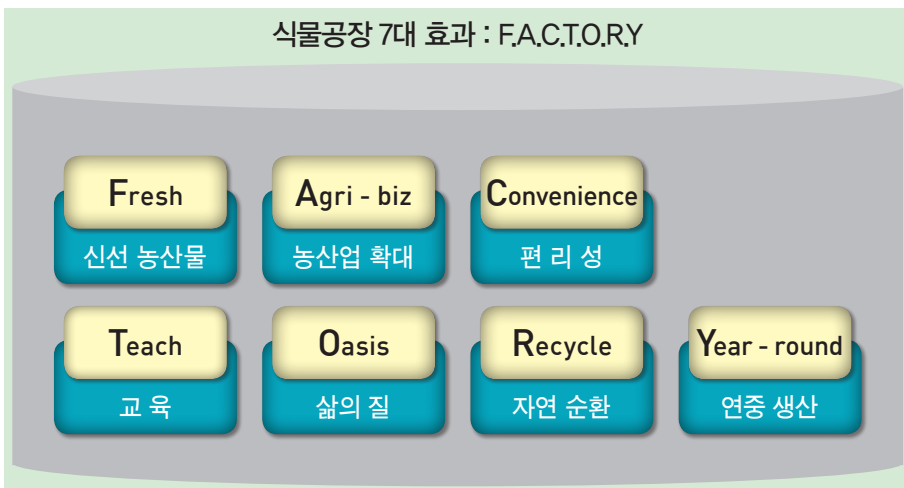
Convenience(편리성) : 자동제어와 로봇개발 등으로 농작업의 편리성을 높일 수 있다.

Teach(교육) : 도시 속 식물공장은 학생, 도시민들에게 식물 생장의 전 과정을 체험하고 학습할 기회를 제공할 수 있다.

Oasis(삶의 질) : 도심 속의 쾌적한 공간제공, 즉 오아시스가 되어 삶의 질을 향상시킬 수 있다.

Recycle(자연 순환) : 식물공장 내에서는 양액, 물, 에너지 등 자원의 재활용이 이루어져 환경오염 방지가 가능하다.

Year-round(연중 생산) : 기후에 영향을 받지 않는 연중 안정적 생산은 식물공장의 가장 큰 장점이다.



〈그림 1-3〉 식물공장의 기대효과(RDA 인테러뱅 10호, 2011년)



특징

식물공장은 씨뿌리기(파종)에서 재배와 거두기(수확)까지 공장시스템에 의해 이루어지므로 관행 농산물 생산과 차별화되며, 그 특징은 다음과 같다.

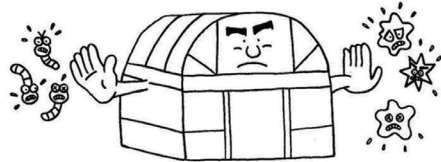
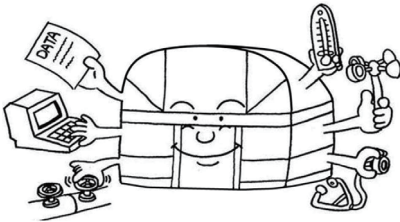
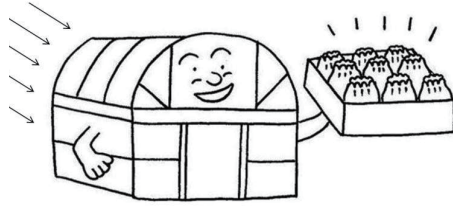
첫째, 환경조절이 가능한 시설 내에서 농작물을 재배하므로 자연환경 변화에 거의 영향을 받지 않고 작물을 재배할 수 있다. 즉 지구환경 변화에 따른 폭우나 폭설, 고온 또는 저온 현상 등과 같은 이상기후에 대응하여 안정적인 농작물의 생산뿐만 아니라 계획생산도 가능하다.

둘째, 지리적인 입지와 지역 환경에 영향을 받지 않고 농작물을 생산할 수 있다. 기존 농업은 생산지의 입지조건과 기후환경에 따라 재배 가능한 작물이 정해지고, 새로운 작물을 재배하기 위해서는 많은 연구와 실증시험 등 많은 시간과 노력이 소요된다. 그러나 식물공장은 도시나 외딴 섬 또는 사막이나 극지 등 극히 제한적인 농업이 가능한 지역에서도 건물만 지을 수 있는 곳이면 작물 생산이 가능하다.

셋째, 계절과 관계없이 노동력을 투입할 수 있고 농작물을 연중 생산할 수 있어 안정적인 농업을 실현할 수 있다. 이는 근로시간을 일정하게 배분할 수 있어 근로자의 소득 안정화를 도모할 수 있고, 농산물 가공이나 식품제조업, 외식업 등 농업 관련 산업의 부가가치를 안정적으로 창출할 수 있다.

넷째, 자동제어가 가능한 공정(씨뿌리기(파종), 모기르기(육묘), 재배, 거두기(수확), 선별, 포장 등)을 통해 최적의 재배조건에서 품질이 우수한 안전 농산물을 생산할 수 있다. 또한, 농작물을 균일화, 규격화된 상품으로 생산해 생산량을 예측할 수 있어 가격 안정화를 도모할 수 있다.

다섯째, 작업의 편리성과 쾌적한 작업환경이 가능하여 관행 농업의 노동기피 현상을 해결할 수 있다. 또한 대도시 인근에서 운영하면 노동력 확보가 쉽고, 농작물의 수송 거리와 시간도 단축할 수 있어 유통비 절감과 신선도 유지에도 많은 이점이 있다.



 <표 1-1> 식물공장의 특징

특 징	내 용
계획생산 및 주년생산	계절과 장소에 좌우되지 않고 생산, 수급조절이 용이
재배환경의 최적 제어	생육 제어, 단기간 대량생산, 수확물의 균일성과 재현성 ^{v1} 향상, 수량 및 품질 향상
작업의 자동화, 노동절약(생력화)	환경관리 · 생산공정(씨뿌리기(파종), 옮겨심기(이식), 거두기(수확), 포장) 자동화로 노력 절감 및 생산성 향상
수확물의 부가가치 제고	고부가가치 작물의 생산 공급, 청정 재배, 영양성분 · 기능성 향상

Tip.

v1 재현성

유사한 상황 아래서 동일한 실험이나 표본조사를 했을 때 그 결과가 어느 정도 동일하게 나오는지를 나타내는 성질

3 식물공장의 구분

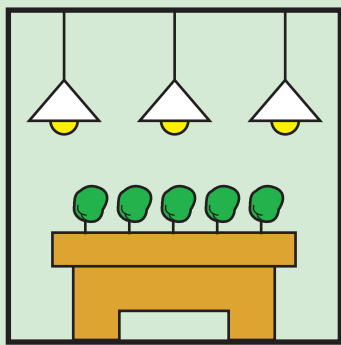
식물공장은 자연환경으로부터 부분적 또는 완전히 차단한 인공환경 안에서 생산하는 시스템이다.

식물공장은 광원의 종류에 따라 완전히 밀폐된 시설에서 인공광만을 이용하여 작물을 재배하는 인공광 이용형 식물공장(이하 인공광 식물공장)과 태양광과 인공광을 동시에 이용하여 작물을 재배하는 자연광 이용형 식물공장(이하 자연광 식물공장)으로 구분한다. 그리고 작물을 배치하는 방법에 따라 입체식과 평면식, 작물의 이동 여부에 따라 고정식과 이동식으로 구분한다.

작물 재배 베드(Bed)를 여러 단으로 배치하는 입체식은 공간이용효율이 높은 반면에, 조명, 온·습도 등을 균일하게 유지할 수 있는 기술이 요구되며 자동화에 많은 비용이 든다. 평면식은 작물 재배 베드를 수평으로 배치하는 방법으로 재배관리 측면에서 작업이 편리하나, 공간이용효율이 떨어지는 단점이 있다. 작물의 재배 베드가 움직이는 이동식은 제어방식이 복잡하고 설치비가 많이 들지만 일정한 장소에서 농작업을 할 수 있어 노동절약(생력화)이 가능할 뿐 아니라 작물의 생육상태에 따라 포기과 포기 사이(주간)를 조절할 수 있어 공간이용효율을 극대화할 수 있는 장점이 있다.

인공광 식물공장

태양광이 투과하지 않는 단열성 재료를 사용하여 외부 기상조건과 완전히 차단하고 광합성에 필요한 빛을 전적으로 인공광원에 의존하는 방식이다. 최적의 생육환경조건에서 재배하므로 작물의 생장제어가 쉽고, 연중 계획생산이 가능한 장점이 있다. 그러나 인공광원을 이용하여 재배하기 때문에 빛의 밝기(세기) 및 빛의 색(광질)에 한계가 있다. 강한 빛이 필요한 작물은 재배가 어려울 뿐만 아니라 초기 설치비 외에도 전력비, 냉난방비 등의 유지관리비가 많이 드는 단점이 있다.



〈그림 1-4〉 인공광 식물공장

가. 시설구조

외부로부터 빛 차단, 단열이 되는 구조로, 일사나 열에너지의 유입에 의한 공조부하¹⁾의 변화를 방지함으로써 1년 내내 환경부하를 일정하게 하여 공기조화기의 용량을 최소한으로 억제한다. 또한, 재배실 내부의 기온과 식물체 온도가 정밀하게 제어되고 주간(명기), 야간(암기)의 시간대를 임의로 조절할 수 있다. 재배실 내 벽면은 최대한 반사율을 높여 빛이용효율을 높이고 있다.

나. 인공조명

형광등과 LED가 많이 사용되며, 식물체 가까이에서 빛을 쏘여(근접조사) 빛이용효율을 높일 수 있다. 빛을 쏘이는 방법으로는 광원을 이동시키는 방법과 간헐 조사방법



등이 있으며, 균일한 빛 조임(광조사)을 위해 광원의 배치방법이나 반사 갖의 활용 등 다양한 방법이 도입되고 있다.

인공광원으로부터 발생하는 열은 수냉식 또는 공랭식으로 제거하여 배출하는 구조를 갖추고 있다. 또한 여름철 재배실 내 냉방부하를 줄이기 위해 야간에만 빛을 쪼이는 방법도 사용하고 있다.

최근에는 LD, 유기 LED 등의 광원을 이용한 연구가 수행되고 있으나 아직 실용화에는 이르지 못하고 있다.

다. 공기조화

인공광 식물공장에서 공조부하의 대부분은 냉방부하다. 인공광원에서 발생하는 열로부터 재배시설 내 온도상승을 억제하기 위한 수단이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 물의 증발냉각이나 히트펌프에 의한 냉방시스템이 많이 이용되고 있다.

라. 가스조절

대부분 실내의 이산화탄소(CO₂) 농도를 센서로 측정하고, 그 수치에 따라 액화 이산화탄소(CO₂) 가스를 자동으로 공급하여 농도를 제어한다. 대체로 대기 중의 이산화탄소(CO₂) 농도로부터 1,200ppm 정도까지 조절할 수 있다.

마. 수경재배

인공광 식물공장에서는 작물 생육에 영향을 미치는 빛, 온도 등 **지상부**^{v2} 환경의 최적화뿐만 아니라 **양액**^{v3} 농도, 뿌리 활성화 등 지하부 환경의 최적화도 중요하다.

Tip.

v1 공조부하(열부하)

가열된 공기를 통풍시키는 공조 대상 공간의 설계조건으로, 실내 온·습도 조건이나 청정도를 유지하기 위한 부하

v2 지상부

식물체의 줄기와 잎 부근

v3 양액

작물이 자라는데 필요한 영양성분을 적정농도의 배양액으로 조성한 액체비료

양액의 온도가 높아지면 뿌리의 호흡속도가 빨라지고 용존산소량¹⁾도 낮아져 산소부족을 초래하므로 작물 뿌리 주위(근권부)의 용존산소량 유지가 중요하다. 이를 위해 재배 베드를 경사지게 설치하는 박막수경(NFT), 분무수경 등이 도입되고 있다. 또한 식물공장에서는 노지재배보다 성장 속도가 빨라 양액의 소비량도 늘어나게 된다. 이에 따라 공급 양액의 이온 불균형 등이 발생하면 생육에 영향을 미치므로 양액탱크를 크게 하여 조성된 양액이 급변하는 것을 방지하거나, 양액 상태를 지속적으로 모니터링하여 양액 농도를 보정해 주어야 한다.

바. 자동화

식물공장에서 생산공정 자동화는 설치비, 노동절약(생력화) 정도, 경제적 가치를 고려하여 선택할 필요가 있다.

씨뿌리기(파종), 모기르기(육묘), 옮겨심기(이식), 포기과 포기 사이 넓히기(주간 조절, Spacing), 거두기(수확), 포장 등 모든 생산공정의 자동화 구축이 가능하지만, 막대한 투자비가 소요되므로 인건비, 노동력이 한꺼번에 많이 필요한 시기(노동피크, Labor Peak) 등을 감안하여 최소비용으로 이윤을 극대화할 수 있는 자동화가 필요하다.

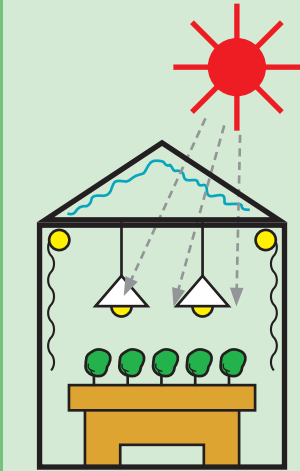
인공광 식물공장에서는 초기 시설투자가 많이 소요되기 때문에 반자동식 시스템을 도입하는 경우가 많다.

자연광 식물공장

유리 또는 플라스틱 필름 등과 같이 빛을 투과시키는 덮는 소재(피복재)를 사용하여 주로 태양광으로 재배하다가 흐리거나 비가 오는 날, 일조량이 부족한 시기에 인공광원을 보조광원으로 이용한다. 특히 다단식 재배시스템은 공간이용효율이 높고 단위면적당 생산량이 증대되는 이점은 있으나, 직사광선이 닿지 않는 재배 단도 발생하므로 부족한 빛을 보충하기 위한 보광설비가 필요하다.

자연광 식물공장은 보조광원 설치비용과 광원에서 발생하는 열을 냉각시키기 위한 공조비용이 증가하며, 환경제어의 정밀성이 인공광 식물공장보다 떨어지는 단점이 있다. 그러나 비교적 간단히 충분한 빛의 양(광량)을 확보할 수 있어서 강한 햇빛을 요구하는 작물재배에 적합하다.

가. 시설구조



〈그림 1-5〉 자연광 식물공장

보통 유리온실이 많이 사용된다. 온도가 높은 시기(고온기) 이외에는 태양광을 이용하여 재배하고, 온도가 높은 시기(고온기)에는 빛을 차단해 열에너지 부하를 작게 하는 동시에 냉방을 실시한다. 인공광 식물공장보다 외부 기상의 영향을 받기 쉬우므로 공조부하가 커지는 것은 피할 수 없다.

나. 인공조명

태양빛을 이용하고 필요할 때 빛을 보충하기 위하여 고압 나트륨램프나 메탈할라이드 램프(Metal Halide Lamp)가 주로 사용된다. 일부 다단 재배방식으로 근접조명용으로 형광등이 사용되기도 한다. 빛의 양(광량)은 어느 정도 인위적으로 제어할 수 있으나 인공광 식물공장보다 제어 정밀도는 떨어지는 단점이 있다.

Tip.

v1 용존산소량

물속에 녹아 있는 산소의 양

다. 공기조화

인공광 식물공장보다 외부 기상조건의 영향을 받기 쉬우므로 온도가 높은 시기(고온기)에 냉방부하가 크다. 이 문제를 해결하기 위해 빛을 차단하고, 심야전력을 이용한 빙축열, 잠열재 축열 등을 이용하는 방법과 지열을 이용한 히트펌프 냉난방시스템이 도입되고 있다. 이외에도 작물이 있는 곳만 냉각시켜주는 국소냉방, 패드 앤드 팬(Pad and Fan System)^{v1} 등의 방법이 이용된다.

라. 가스조절 및 수경재배

인공광 식물공장의 경우와 크게 다를 바 없다.

마. 자동화

자연광 식물공장은 재배규모가 크기 때문에 생산공정 자동화가 필요한 경우가 많지만 인공광 식물공장과 마찬가지로 인건비, 노동력이 한꺼번에 많이 필요한 시기(노동피크, Labor Peak) 등을 고려해 이윤을 극대화할 수 있는 방향으로 자동화 구축이 필요하다.

 <표 1-2> 자연광 식물공장 및 인공광 식물공장의 차이점

구분	자연광 식물공장	인공광 식물공장
건물구조	고도의 시설원에	완전 밀폐된 시설
광원	고압 나트륨램프, 메탈할라이드램프	형광등, LED
온도조절	대형 냉난방기	특수 공조시설, 냉난방기
환경제어	외부영향을 받아 정밀 제어가 곤란	정밀제어가 가능
재배방식	평면식, 입체식	입체식
재배식물	열매채소류(과채류), 화훼류, 잎채소류(엽채류), 허브류	잎채소류(엽채류), 허브류
생육관리	균일한 생육관리 곤란	안정적인 생육관리 가능
생산성	연중 생산이 가능하나, 계절적인 영향을 받기 쉬움	계절적인 영향이 없이 연중 생산
시설비	저렴(투자대비 수익 높음)	고가(수익대비 투자비 높음)
주요 유지비	냉난방비, 인건비	전기료(조명, 냉난방), 인건비

Tip.

v1 패드 앤드 팬(Pad and Fan System)

온실의 가장자리 또는 벽에 물을 흘려 물기를 흡착한 패드를 설치하고 반대쪽의 벽 부근에 팬을 설치해 실내를 냉각하는 방법으로, 물이 증발하면서 주위의 온도를 빼앗아가는 성질을 이용한 온실냉각법의 하나이다.

4 국내·외 식물공장 현황

국내

식물공장은 새로운 식물생산시스템으로 국민적인 관심이 높다. 특히 지역이나 농경지에 구애받지 않고 식물생산이 가능하고, 에너지 효율을 극대화할 수 있으며, 생산지에서의 소비가 활성화되므로 푸드 마일리지(Food Mileage)도 줄일 수 있다. 무엇보다 가능성 작물생산이 가능하기 때문에 고부가가치 식물생산시스템으로 활용성이 클 것으로 기대된다.

우리나라의 식물공장 연구는 1990년대 초에 첨단 유리온실사업이 본격 추진되면서 함께 이뤄졌으며, 농촌진흥청은 1996년에 관련 연구를 시작하여 2004년에 자연광 식물공장을 개발했다. 현재 대학, 민간업체 등에서 LED 등 다양한 식물공장 연구가 활발히 진행되고 있다.

식물공장 사업과 관련된 업체는 크게 나누어 <표 1-3>과 같이 재배시스템 개발업체, 영농업체, 식품업체, 건설업체 등으로 구분할 수 있다.

 <표 1-3> 식물공장 업체 유형

업체 유형	관련 업체
재배시스템 개발업체	인성테크, 와이즈센싱, LG CNS, 카스트친환경농업기술, 오디텍, 파루, 세기교역상사, 유양디앤유 등
영농업체	리프레시함양, 참농원, 태연친환경농업기술, 에코스프라우트, 베지텍스, 이음 등
식품업체	롯데, CJ, 현대그린푸드, 농심 등
건설업체	포스코건설, 태종씨앤아이, 두원산업 등

재배시스템 개발업체는 LED, 센서, 재배시스템 등을 식물공장에 접목하고 있는 업체들로, 현재 시장 확대를 주도하고 있다. 이들은 국내 보급용 소형 식물공장시스템, 해외 수출용 컨테이너형 식물공장 등을 개발 생산 중이다. 영농업체는 식물공장에서 잎채소류(엽채류)를 재배·판매하는 사업을 추진하고 있으나, 수익성 문제로 고부가가치 작물을 생산·판매하는 방향으로 전환 중이다.

식품업체는 안전하고 안정적인 식자재 확보를 목적으로 식물공장을 이용하고 있으나, 작물 재배기술 부족과 높은 시설비로 인해 적극적으로 추진하고 있지는 못한 실정이다. 건설업체는 아파트 고급화를 위한 비포마켓(Before Market)^{v1} 용도의 식물공장을 추진 중에 있다. 일부 기업은 식물공장 하우스 건설을 플랜트 사업으로 추진하고 있다.

국외

외국의 식물공장은 유럽, 미국, 일본을 중심으로 연구개발 및 보급이 이루어지고 있다. 유럽에서는 1950년대 이후 노지재배로부터 비닐하우스와 유리온실 등의 시설재배 형태로 발전했다. 세계 최초의 식물공장은 덴마크 크리스텐센(Christensen, 1957년) 농장으로, 기존 자연광에만 의존하던 방식에 형광등을 도입하여 일조량 부족을 해결하고, 컨베이어 벨트를 이용하여 싹채소의 대량생산에 성공했다.

주로 대형 유리온실 안에서 자연광 식물공장 형태를 채택하여 화훼류와 허브류를 생산하고 있고, 열매채소류(과채류) 생산도 증가하고 있다. 식물공장의 운영주체는 농업인 중심이었으나 최근 농산유통기업으로 바뀌는 추세이다.

식물공장은 자동화 설비를 갖춘 유리온실 형태이고, 잎채소류(엽채류), 허브류, 열매채소류(과채류) 생산 및 싹종 등 다양한 작물을 생산하거나 품종을 개발하는데 이용되고 있다.

네덜란드는 자연광 식물공장 안에서 이루어지는 작업공정을 최대한 자동화했고, 신재생에너지 이용 및 에너지 절감 관점에서 새로운 개념의 식물생산시스템을 제시하는

Tip.

v1 비포마켓(Before Market)

제품 판매(출고) 전에 형성되는 시장의 제품들로 자동차의 경우 내비게이션, 카오디오, 차량경보기 등이 해당한다.



등 세계의 식물공장 생산기술을 선도하고 있다. 스웨덴의 Agritech Innovation사에서 개발한 스웨데포닉 시스템(Swedeponic System)은 채소·허브용 잎채소류(엽채류)를 생산하는 식물공장으로, 유럽 전역에 설치되어 운영 중이다. 이와 함께 모의 자동 옮겨심기(묘 자동이식), 포기과 포기 사이의 간격 조절(주간조절), 자동이송, 아주심기(정식) 등의 공정을 완전 자동화한 벨기에 Hortiplan사의 재배 베드 자동이송시스템(Mobile Gully System)을 설치한 식물공장도 늘고 있다.

미국은 1960년대에 제너럴 일렉트릭(General Electric)사에서 인공광 식물공장을 개발하였으나, 경영비 문제로 운영이 중단되었다. 식물공장 생산시스템에 대한 실용화 연구는 1970년대에 들어서면서 일부 회사에서 사업화를 본격적으로 추진하였으나 채산성 문제로 중단되었다. 그 후 일부 대학을 중심으로 LED 등 인공광을 농업에 활용한 연구가 수행되었고, 1999년 컬럼비아대학교의 딕슨 데스포미어(Dickson Despommier) 교수가 빌딩형 식물공장 개발 모델을 제시한 바 있다.

일본은 인공광 식물공장의 비중이 유럽에 비해 높으며, 전력, 식품, 유통회사 등 기업에서 여러 형태의 식물공장이 운영되고 있다. 일본은 식물공장 산업을 2008년 글로벌 금융위기 이후에 미래 신성장동력산업으로 육성하고 있다. 농림수산성에서는 식물공장 건설사업자에게 보조금을 지원하고 있으며, 경제산업성에서는 식물공장 관련 기술 개발에 대한 보조금을 지원하는 정책을 추진 중이다. 특히 2009년 범정부 차원의 '식물공장 보급확대 종합대책' 수립을 계기로 2012년 기준 120여 곳으로 확대 보급되고 있다. 2011년 후쿠시마 원전사고 이후 대규모 식물공장에 대한 필요성이 크게 부각되었고, 무엇보다 원전사고에 의한 오염지역에 식물공장을 건설·운영하는 것을 지역의 부흥 수단으로 인식하고 있다. 또한 지자체와 연계한 장애인, 노인 일자리 창출 목적으로도 식물공장 사업을 추진하는 사례도 증가하는 추세이다.

5 발전과정

식물공장 도입기(1957~1970년)

제1단계는 식물공장 도입기(1957~1970년)로, 시설원예가 발달한 유럽지역에서 자연광을 주로 이용하면서 일조량 부족을 고압 나트륨램프로 빛을 보충했다. 수평으로 재배하는 방식이 주를 이뤘지만, 재배 베드를 상하로 이송하는 수직재배도 시도된 바 있다. 이러한 방식은 당시에는 획기적인 시설원예로 자연광을 이용하는 부분 제어형 식물공장의 기본 형태로, 경제성과 실용화를 고려하면 현재까지 가장 유리한 식물공장의 유형이라 할 수 있다.

실용화 초기(1971~1990년)

제2단계는 실용화 초기(1971~1990년)로, 자연광보다 고압 나트륨램프, 메탈헬라이드 램프 등 인공광이 주로 사용되었고, 컴퓨터를 이용한 온·습도 조절 및 다양한 자동화 장치가 도입됐다. V자형 재배 베드, 분무수경방식의 2단 재배가 시도되었고, 재배 시설에 대한 기술도 획기적으로 발전됐다.

실용화 진입기(1991~2007년)

제3단계는 실용화 진입기(1991~2007년)로, 이전에 개발된 기초적인 식물공장의 지식을 바탕으로 일부 식물을 재배하여 판매하는 상업화 단계이다. 소비전력이 적게 소모



되고, 열이 적게 나는 LED(발광다이오드) 등이 인공광원으로 도입되면서 다양한 식물공장의 형태로 발전했다. 스펀지에 직접 씨앗(종자)을 뿌리는 기술, 재배 베드 이송 기술 등 식물공장 자동화 기술이 완성된 시기이기도 하다. 또한 컴퓨터를 이용한 환경제어는 물론 웹기반의 원격 환경조절 시스템에 의한 환경제어 기술도 정착됐다.

실용화 실현기(2008년 이후)

제4단계는 실용화 실현기(2008년 이후)로, 채소류에 농약잔류와 기생충 발생 등의 안전성이 사회적으로 이슈화되면서 완전 무공해 신선채소를 생산할 수 있는 식물공장에 대한 관심이 증대되는 시기이기도 하다. 선진국의 경우 적극적인 투자를 통해 식물공장과 관련된 산업분야가 비약적으로 발전됐다.

식물공장은 기후변화에 대응한 적극적인 식물생산 방안의 하나이고, 플랜트 수출 및 신성장 동력산업의 한 분야로 인식되면서 선진국에서는 세계시장을 선점하기 위해 정부 주도하에 지속적인 지원을 확대하고 있다.

일본과 미국에서는 도심 내에서 고층 건물방식의 빌딩형 농장(Building Farm) 또는 수직형 농장(Vertical Farm)인 식물공장을 개발하고 있다. 또한 풍력 및 태양열 등의 신재생 에너지를 사용하여 화석에너지 소비를 최소화하기 위한 연구도 추진하고 있다. 컬럼비아대학교의 딕슨 데스포미어 교수는 30층의 수직형 식물공장장에서 약 5만 명이 먹을 수 있는 식량을 생산할 수 있을 것으로 예측하고 있다.

국내에서도 2009년 이후부터 농촌진흥청을 중심으로 식물공장 연구가 활발히 수행되고 있으며 그동안의 성과가 축적되면서 자동화 요소기술, 재배기술 등이 비약적으로 발전하고 있다.

6 향후 발전방향 및 전망

전 세계적으로 지구온난화 등 기후변화로 인한 농산물의 수급 불안정과 가격 급등, 식품 관련 산업의 리스크 증가 등으로 식물공장의 필요성은 더욱 증가할 뿐만 아니라 발전전망도 밝다.

일본 나노경제연구소 전망에 따르면, 일본의 식물공장 시장규모는 2009년 138억 6,200만 엔에서 2015년 310억 엔으로 2009년 대비 2.2배, 2020년에는 4.6배 증가한 640억 엔으로 향후 2~5배 증가할 것으로 예측하고 있다(2012년). 자연광 및 인공광 식물공장 시장은 잎채소류(엽채류)를 중심으로 안정적으로 발전해 나갈 것이다. 이외에 토마토나 딸기 등의 열매채소류(과채류)를 시작으로 재배품목의 확대와 더불어 2015년 이후에는 기능성 채소 등 고부가가치 품목의 실용화 및 시장 확대가 가속화될 것으로 전망된다.

우리나라는 기상이변 등 농업환경의 악화에 대비하고, 미래 농업기술 수요에 대응하기 위해 국가 연구기관을 중심으로 관련 연구를 추진하고 있다. 대부분 식량안보, 재난 등 위기상황을 대비한 미래지향적 연구과제로 수행되고 있으나 향후 기술발전의 속도를 고려할 때 식물공장의 실용화는 가속화될 전망이다.

특히 우리나라의 강점인 IT기술과 그동안 축적된 시설원예기술을 접목하여 우리의 농업환경에 적합한 한국형 식물공장 수익모델을 개발하면, 식물공장 기술의 우위선점과 더불어 시설원예 고도화에도 크게 기여할 것이다.

한편, 지금까지 식물공장 운영에서 도출된 문제점은 높은 시설 투자비와 운영비, 생산물의 판로 미확보 등을 들 수 있다. 식물공장에서 생산되는 채소는 일반 채소에 비해 생산비가 비싸고 가격이 높기 때문에 어떻게 차별화 시켜나갈 것인가가 핵심이 된다. 식물공장의 실용화를 위해 인공광 식물공장은 초기 투자비 및 운영비 절감, 품질 차별화가 필요하다. 그 해결책으로 전반적인 시스템을 최대한 저렴한 비용으로 설치



할 수 있도록 하느냐가 중요하다. 따라서 조명 설비비용 절감 및 조명효율 향상 연구, 영양가 및 기능성이 높은 작물 생산에 대한 연구, 자동화, 로봇, 신재생 에너지, 작물 재배 기술과의 융·복합 연구 등이 체계적으로 이루어져야 한다. 예를 들면, 인삼 등 약용성분이 높은 작물을 대상으로 재배기간 단축에 대한 기술 개발도 유효할 것으로 생각된다. 자연광 식물공장은 온도뿐만 아니라 습도, 이산화탄소(CO₂) 농도, 빛, 바람 등을 어느 정도 정밀제어가 가능하면서 가격이 싼 재배시설 개발이 필요하다. 또한 데이터터를 기반으로 과학적, 합리적으로 식물공장을 운영할 수 있는 전문가 육성도 병행되어야 한다.

앞으로 식물공장 연구는 잎채소류(엽채류)뿐만 아니라 열매채소류(과채류), 화훼류 등에 대해서도 공장적 생산을 위한 자동화시스템 개발이 추진될 전망이다. 공정생산이 가능한 작목의 선정, 공정에 적합한 장치 등의 개발 및 자동화 기술을 정립하고, 자동화에 의한 작업능률과 생산성 향상을 통해 우리나라 시설농업이 국제경쟁력을 갖출 수 있도록 해야 될 것이다.

식물공장의 발전을 위해서는 식물공장 R&D(연구개발)와 더불어 경제적, 제도적 측면에서 여러 가지 대책이 강구되어야 할 것이다.

첫째, 융·복합 R&D를 통한 원천기술 확보가 필요하다. 식물공장은 농업과 정보통신, 생명공학, 우주공학 등 융·복합기술의 결정체로 미래의 신성장동력이라는 인식이 필요하다. 선진국은 오래전부터 전략적으로 식물공장과 관련된 기술개발을 통해 원천기술 확보에 주력하고 있다. 따라서 우리의 강점인 IT, LED 등 신소재산업 등과 공동으로 원천기술을 개발할 수 있는 협력체계 구축이 필요하다.

둘째, 식물공장 관련 제도정비가 필요하다. 식물공장은 새롭게 부상하는 성장분야이므로 관련 법·규정을 산업의 육성이라는 시각에서 규제완화 등 노력을 기울여 나가야 한다. 2009년 1월 저탄소 녹색성장이 국가 어젠다(Agenda)로 채택됨에 따라 첨단 식물공장에 대한 산업육성 기반이 마련되었고, 향후 식물공장 산업의 육성을 위해 해당 부처 간의 효율적 역할 분담을 통한 시너지 창출이 중요하다.

셋째, 식물공장 산업을 종합 플랜트 개념으로 범위를 확대하여 차세대 수출산업으로 육성할 필요가 있다. 특히 사막, 극지 등 농업환경이 열악한 지역에 식물공장 관련 기술과 재배기술, 플랜트 기술 등을 수출하려는 노력이 필요하다.

미래의 식물공장은 씨뿌리기(파종)부터 거두기(수확)까지 완전 무인시스템으로 운영되

고, 모든 농작업은 로봇에 의해 이루어지며 생산자는 농작물의 생육환경 상태를 네트워크에 연결하여 언제, 어디서나, 어떤 상황에서도 식물의 생육을 관찰하고 원격 제어하여 원하는 수준의 식물을 생산할 수 있게 될 것이다. 소비자들은 식물공장에서 재배하는 기능성 농산물을 컴퓨터나 스마트폰으로 주문할 수 있고, 수확한 농산물은 유통시스템과 실시간 연계되어 반나절 만에 각 가정의 식탁에 오르게 될 것이다.

도시의 식물공장은 농업, 주거, 공업, 상업의 복합공간인 빌딩농장으로 발전하면서 작물재배 이외에 농업체험, 관광, 식당, 영화관이 함께하는 복합문화공간으로 이용될 것으로 전망된다. 아파트단지, 사회복지시설, 병원, 사무실 등에도 식물공장이 설치되어 도시민의 심신휴양 정서순화 등 삶의 질 향상에도 기여하게 될 것이다.

유비쿼터스 기술 등 IT산업, 기능성 식·약품의 대량생산 등 BT 산업, 관광 및 레저산업 등 후방산업도 동반하여 성장하게 될 것이고, 생명공학 기술을 이용하여 인삼 등 기능성 식품이나 고기능성 의약품, 백신을 대량생산하는 바이오산업의 발전과 더불어 맞춤형 가정용 식물공장도 보급될 것이다.



MEMO

A large rectangular area with rounded corners, outlined in green, containing horizontal dashed lines for writing.

1장 식물공장 개요

1. 식물공장의 필요성

- ▶ 단위면적당 생산성의 획기적인 증대
- ▶ 농산물의 지속적인 안정생산 및 소비자의 수요와 기호에 부응
- ▶ 편한 농작업 구현과 노동생산성 향상

2. 식물공장의 개념

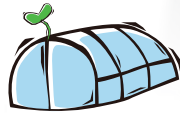
- ▶ 환경조절을 통해 작물의 연중 생산과 계획 생산이 가능하고 작물의 수량과 품질을 조절할 수 있는 공장형 식물생산시스템
- ▶ 식물공장의 5대 핵심기술 : Place(장소), Light(빛), Auto(자동화), Nutrient(양분), Temperature(온도)
- ▶ 식물공장의 7대 효과 : Fresh(신선 농산물), Agri-biz(농산업 확대), Convenience(편리성), Teach(교육), Oasis(삶의 질), Recycle(자연 순환), Year-round(연중 생산)

3. 식물공장의 구분

- ▶ 인공광 식물공장 : 태양광이 투과되지 않는 단열성 재료를 사용해 외부 기상조건을 완전히 차단하고 광합성에 필요한 빛을 인공광원에 의존하는 방식
- ▶ 자연광 식물공장 : 유리 또는 플라스틱 필름 등 빛을 통과시키는 덮는 자재(피복재)를 사용해 주로 태양광으로 재배를 하다가 흐린 날, 비오는 날 등에는 인공광원으로 빛을 보충하는 방식
- ▶ 자연광 식물공장과 인공광 식물공장의 차이

구분	자연광 식물공장	인공광 식물공장
건물구조	고도의 시설원에	완전 밀폐된 시설
광원	고압 나트륨램프, 메탈할라이드램프	형광등, LED
온도조절	대형 냉난방기	특수 공조시설, 냉난방기
환경제어	외부영향을 받아 정밀 제어가 곤란	정밀제어가 가능
재배방식	평면식, 입체식	입체식

핵심만 꼭! 꼭!



재배식물	열매채소류(과채류), 화훼류, 잎채소류(엽채류), 허브류	잎채소류(엽채류), 허브류
생육관리	균일한 생육관리 곤란	안정적인 생육관리 가능
생산성	연중 생산이 가능하나, 계절적인 영향을 받기 쉬움	계절적인 영향이 없이 연중 생산
시설비	저렴(투자대비 수익 높음)	고가(수익대비 투자비 높음)
주요 유지비	냉난방비, 인건비	전기료(조명, 냉난방), 인건비

4. 국내·외 식물공장 현황

- ▶ 1990년대 초반 시작된 우리나라의 식물공장 연구는 현재 정부, 지자체, 대학, 연구소, 민간업체 등에서 활발히 진행 중이다.
- ▶ 외국의 식물공장은 유럽, 미국, 일본을 중심으로 연구개발 및 보급이 이뤄지고 있다.

5. 발전과정

- ▶ 1단계 식물공장 도입기(1957년~1970년) : 유럽의 시설원예농가를 중심으로 시작
- ▶ 2단계 실용화 초기(1971~1990년) : 인공광이 주로 사용되고, 다양한 자동화 장치 도입
- ▶ 3단계 실용화 진입기(1991~2007년) : 일부 식물을 재배해 판매하는 상업화 단계
- ▶ 4단계 실용화 실현기(2008년 이후) : 완전 무공해 신선채소를 생산할 수 있는 식물공장에 대한 관심 증대 및 관련 산업분야의 비약적 발전

6. 향후 발전방향 및 전망

- ▶ 기술개발과 더불어 식물공장 실용화는 가속화될 전망
- ▶ 잎채소류 뿐만 아니라 열매채소류, 화훼류에 대한 기술개발 추진
- ▶ 초기 투자비 및 운영비 절감, 품질차별화, 재배기간 단축, 자동화 등 기술개발과 경제적, 제도적 측면의 대책 강구

제2장

인공광 식물공장



1. 개요
2. 종류와 특징
3. 광원 및 조명
4. 공기조화
5. 자동화
6. 환경제어
7. 수경재배



인공광 식물공장은 햇빛 대신 LED(발광 다이오드), 고압 나트륨램프, 메탈할라이드램프 등 인공광원을 사용하며 물과 영양분으로 만드는 배양액으로 작물을 재배하는 시설이다. 작물이 자라는데 가장 적합한 환경을 인공적으로 만들어 제공하기 때문에 무공해 농산물을 생산할 수 있다.

1 개요

인공광 식물공장은 폐쇄된 공간에서 인위적으로 환경을 제어하면서 햇빛 대신 인공광을 이용하여 물과 영양분으로 만든 배양액으로 작물을 재배하는 시설이다. 즉 구조물 외부로부터 유입되는 빛과 열에너지를 차단·단열하여 식물재배에 적합한 인공 환경을 제공한다.

건축재료는 철근콘크리트, 벽돌 등과 같은 구조재와 글라스울, 열반사 단열재, 폴리스틸렌, FRP 등과 같은 단열재가 사용된다. 광원으로는 형광등이나 LED, 냉음극형광등(Cold Cathode Fluorescent Lamp, CCFL), 외부전극형광등(External Electrode Fluorescent Lamp, EEFL) 등이 사용되고 있으며, 현재 형광등과 LED가 주로 사용되고 있다. 인공광 식물공장에서 적용하고 있는 수경재배는 박막수경(NFT, Nutrient Film Technique) 방식이 일반적이며, 일부 식물공장에서는 식물뿌리에 양액을 분사하는 분무경 방식이 사용되기도 한다.

인공광 식물공장의 가장 큰 특징은 완전 폐쇄형이기 때문에 무농약 재배가 가능하며 다단 재배 채택으로 단위면적당 생산성이 높다. 또한 생육기간을 단축할 수 있고, 외부 환경의 영향을 덜 받기 때문에 환경제어가 비교적 용이하다. 즉 재배실 내부의 기온을 정밀하게 제어할 수 있고, 주간(명기)과 야간(암기)의 시간대를 임의로 조절할 수 있다.

하지만 초기 비용과 제조원가가 차지하는 감가상각비의 비중이 매우 높고 인공조명을 사용하므로 조명을 위한 전기료와 공조비용의 부담이 크다.

식물공장은 작물 재배실과 육묘실 이외에 작업실, 제어실, 기계실, 저장실 등의 공간이 필요하다. 인공광 식물공장의 초기 투자비를 줄이기 위해서는 재배실과 육묘실은 70% 정도로 확보하고 작물 재배와 직접 관련이 없는 공간을 최소화할 필요가 있다.

식물공장 건설비는 크게 건축비와 설비비로 구성되며, 이 중에서 설비비가 차지하는



비중이 건설비의 60~70%에 해당한다. 설비비 중 조명 장치와 공기조화 설비가 절반 정도를 차지한다. 초기 투자비와 운영비를 줄이기 위해서는 설계 및 시공 단계부터 난방부하를 줄이고 조명효율을 극대화시키도록 노력해야 한다.

2 종류와 특징

빌딩형(건물형)

빌딩형 식물공장은 주택이나 사무실과 같이 지붕과 네 개의 벽면으로 이루어진 구조물이다. 밀폐와 단열은 효율적인 냉난방을 위해, 공기조화 설비와 해충유입 방지시설은 무농약 친환경 작물생산을 위해 중요한 요소이다.

건물 유리창은 조망, 환기, 통풍과 자연채광을 위해 설치하지만 실내의 기밀성^{v1}을 저하시킨다. 건물 내 냉난방을 위해서는 많은 에너지가 필요하고, 외부로부터 유리창을 통해 입사^{v2}된 태양광에 의해 건물 내부에 더운 공기가 위로 올라가는 대류현상이 일어나 냉방효율을 떨어뜨린다. 식물공장 내부는 일반 건물에 비해 습도가 높아서 외부 기온이 낮은 시기에는 이슬이 맺힌다. 따라서 건축 시에는 가능한 창을 내지 않도록 하며 부득이하게 창을 만드는 경우에는 밀폐하거나 이중창을 설치하는 등 기밀성 유지를 위한 적절한 단열조치가 필요하다.

공기조화 설비는 온·습도를 조절하는 열적인 기능과 청정도, 기류속도를 조절하는 환기 기능이 있다. 에너지 사용량을 줄이고 작물 생장에 적합한 실내 환경을 조성하기 위해서는 열환경과 공기환경을 연계하여 조절한다.

해충유입 방지 시설에는 소독시설, 차단시설 등이 있다. 건물의 창문 틈, 배수구 및 환기구 틈 등을 밀폐하여 해충 유입경로를 차단한다.

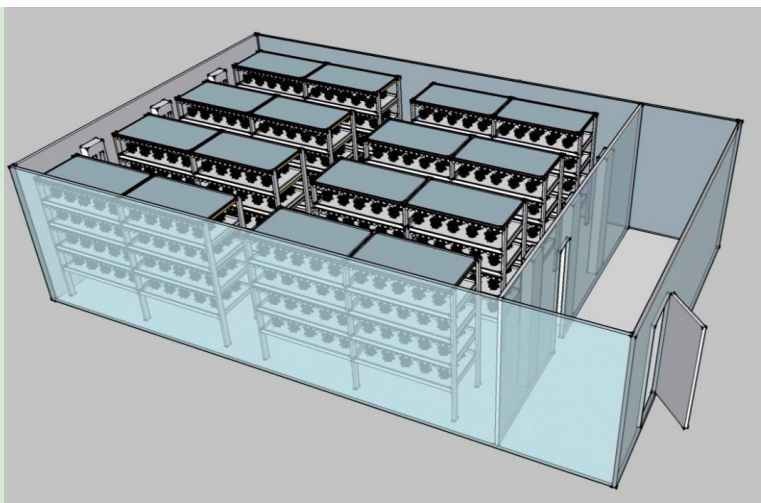
Tip.

v1 기밀성

공기, 가스 등의 기체를 통하지 않는 성질. 통기 성능이라고도 한다.

v2 입사

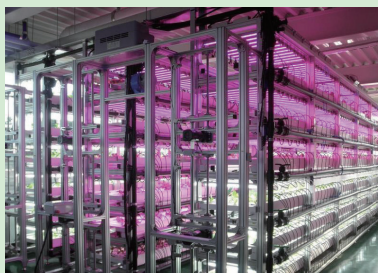
하나의 매질(어떤 물리적 작용을 한 곳에서 다른 곳으로 옮겨 주는 매개물) 속을 지나가는 소리나 빛의 파동이 다른 매질의 경계면에 이르는 일



〈그림 2-1〉 빌딩형 식물공장



〈그림 2-2〉 농촌진흥청 식물공장연구동



〈그림 2-3〉 다단 재배시스템

빌딩형은 태풍, 홍수, 가뭄 등 기상재해로부터 안전하고 효과적인 재배가 가능하며, 대도시에서도 작물 재배가 가능해 운송료가 절감된다. 빌딩형은 초기 건설비가 많이 들기 때문에 선택적 시설투자가 필요하며, 신축보다는 기존 건물의 유희공간, 빈 공공 건물 등을 활용하는 방안도 효과적이다.

컨테이너형

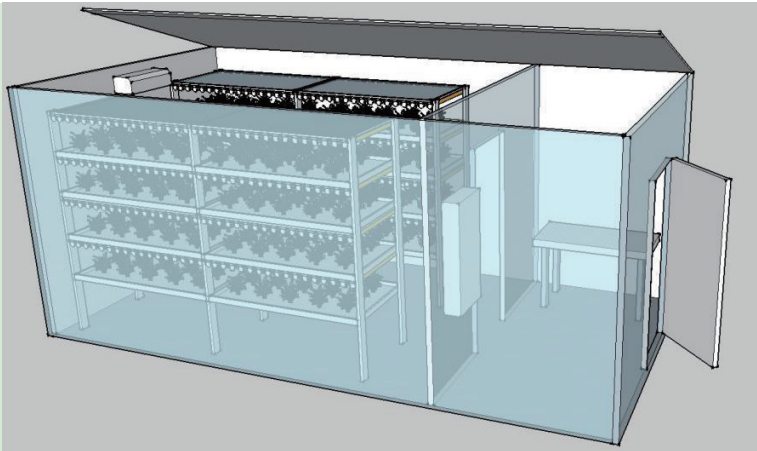
컨테이너형 식물공장은 냉동 컨테이너를 식물재배에 알맞게 개조한 구조물이다. 일반적으로 냉동 컨테이너는 냉동, 냉장제품의 운송을 위해 철판 사이에 70~120mm 두께

의 폴리우레탄 폼을 주입한 단열재가 사방을 둘러싸고 있어 보온성과 단열성이 우수하다.

일반 화물용 컨테이너는 열전달이 빠른 철제로 되어 있기 때문에 냉난방을 위한 단열 처리 등 개조가 필요하다. 단열재로는 스티로폼, 글라스울 등이 사용되고 내벽면은 반사율을 높여 빛이용효율을 높인다.

컨테이너 규격은 20ft(폭 2,438mm × 높이 2,591mm × 길이 6,058mm)와 40ft(폭 2,438mm × 높이 2,591mm × 길이 12,192mm) 2종이다. 컨테이너 좌우에는 3~4단의 재배선반, 양액공급순환시스템, 냉난방기, 열교환기, 광원, 환경제어장치 등을 설치한다.

컨테이너형 식물공장은 초기 투자의 위험이 적고 컨테이너 증설로 규모 확대가 용이하고 별도의 설치공사가 필요 없으며, 전기와 물만 공급되면 바로 가동할 수 있기 때문에 홍보용, 연구용으로 활용하고 있다.



〈그림 2-4〉 컨테이너형 식물공장



〈그림 2-5〉 남극 컨테이너



〈그림 2-6〉 남극 컨테이너 내부



남극세종기지 20ft 컨테이너형 식물공장에서는 LED와 형광등을 혼합한 빛을 쏘여 상단에는 쌈채소, 중간단에는 어린 잎 채소, 맨 아랫단에는 새싹채소를 재배하며, 하루 약 1kg의 신선채소를 생산해 연구원 1인당 50g의 신선채소를 먹을 수 있다.

조립형(창고형)

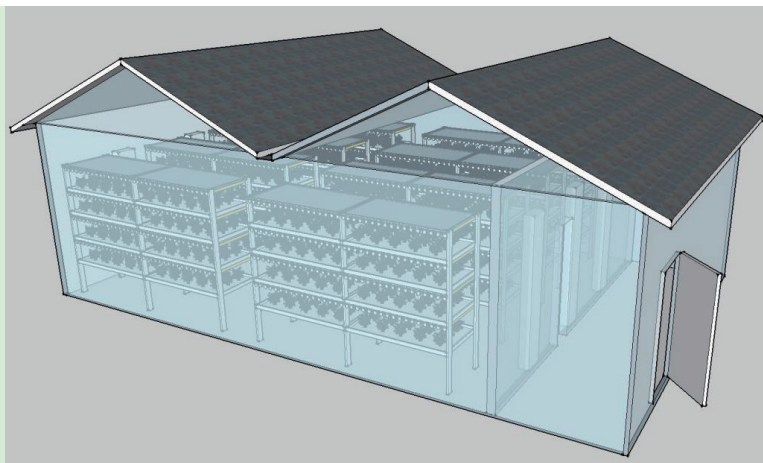
조립형 식물공장은 양면이 철판으로 되어 있고 철판 사이에 단열재가 들어 있는 샌드위치 패널을 사용한 조립식 건축물이다. 단열재에는 발포 폴리스틸렌, 우레탄폼, 글라스울 등이 있다. 국내에서 생산, 판매되는 샌드위치 패널의 두께는 50, 75, 100, 125, 150mm 등이다. 패널의 폭은 600, 750, 900, 1,000mm로 1,000mm가 일반적이다. 샌드위치 패널은 단열성과 내구성이 뛰어나고 유지보수가 용이하다. 공장에서 생산한 제품을 현장에서 조립하여 설치하기 때문에 공사기간이 단축되고 시공비가 저렴하다. 값이 싼 스티로폼이 내장된 패널을 가장 많이 사용하지만 화재에 취약하다. 화재 예방을 위해서는 글라스울과 미네랄을 같이 불에 잘 타지 않는 단열재가 내장된 패널을 선택한다. 우레탄 패널에는 난연 3급인 PIR(Polyisocyanurate)과 비난연(PUR)패널이 있는데, 건축법에 의한 내외장재로 사용하는 난연 3급 패널을 사용한다.

 <표 2-4> 건축용 단열재의 열전도율

단열재 종류	밀도(g/cm³)	열전도율(kcal/m·h·℃)
유리면	0.01~0.04	0.028~0.043
난연성 발포폴리스틸렌폼	0.016~0.03	0.022~0.039
석고보드	0.85~0.90	0.11~0.35
폴리우레탄폼	0.016~0.03	0.022~0.025

강판은 도장용 아연도금 강판을 사용하는데 벽체용과 지붕용 아연도금 함량이 다르기 때문에 용도에 맞는 제품을 선택한다.

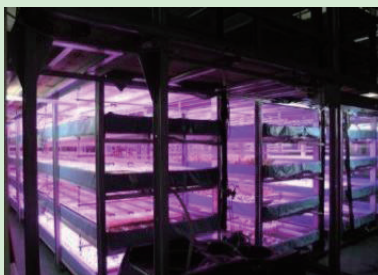
조립형 식물공장을 건축할 경우, 공장 부지가 허락하는 한 원하는 규모대로 건축이 가능하다. 또한 공장 내부에 재배실, 육묘실, 사무실 등의 공간 배분이 용이하며, 패널, 광원, 재배선반 등을 자유롭게 배치·설치할 수 있다.



〈그림 2-7〉 조립형(창고형) 식물공장



〈그림 2-8〉 베지텍스 일산팜



〈그림 2-9〉 카스트친환경농업기술

3 광원 및 조명

빛의 기초

인공광 식물공장을 설계할 때 최우선으로 고려해야 할 것이 조명설계이다. 대상작물에 따른 광원의 종류, 제어 방식, 개수, 배치, 조명(광조사) 장치 및 조사기술 등이 중요하다.

인공광 식물공장에서 이용되는 광원에는 형광등(Fluorescent Lamp), LED(Light Emitting Diode), 냉음극형광등(CCFL : Cold Cathode Fluorescent Lamp), 외부전극형광등(EEFL : External Electrode Fluorescent Lamp), 고압 나트륨램프(High Pressure Sodium Lamp), 무전극램프, 플라즈마 램프(PLS) 등이 있다.

식물이 느끼는 빛의 세기(광강도)의 단위는 광량자속밀도 [$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]로 표시한다. 광양자수는 보통 μmol (마이크로 몰) 단위로 나타내며 1몰은 6.023×10^{23} 개이다. 빛 세기는 광합성에 유효한 가시광선 영역 400~700nm의 광이 일정 시간동안 단위면적에 입사되는 광양자수로, 이를 광량자속밀도라 한다.

가. 빛의 세기

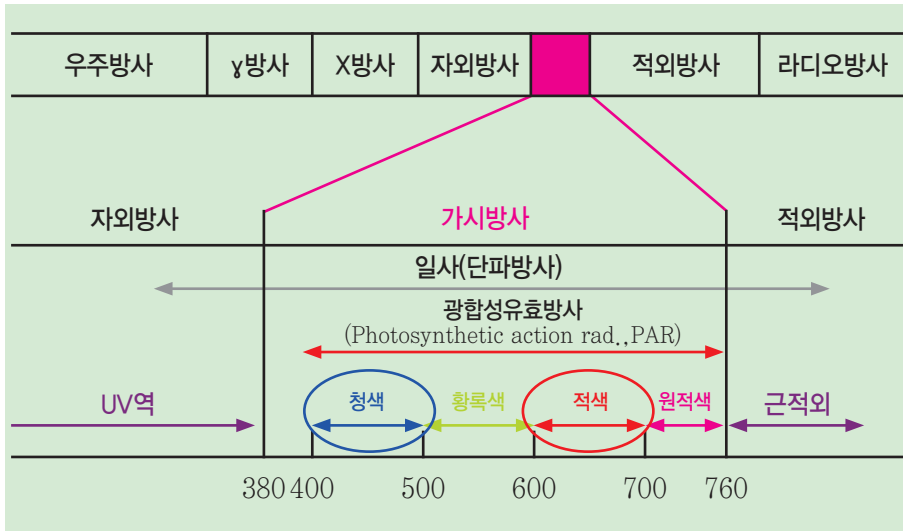
빛은 광합성 작용의 에너지원이므로 광합성에는 빛이 필요하며, 빛의 세기가 강해질수록 광합성량도 증가한다. 식물재배에 이용되는 광원의 강도는 인간 눈의 감도와 다르다. 인간의 눈으로 가장 밝게 느끼는 최대감도인 555nm의 녹색광은 엽록소 흡수가 거의 이루어지지 않는 영역이다. 예를 들어 식물의 광합성과 형태형성에 관여하는 450nm의 청색광은 **비시감도**^{v1}가 0.038로, 동일한 에너지라도 인간의 눈은 녹색광의

Tip.

v1 비시감도

555nm에 대한 인간 눈의 감도를 1로 했을 때의 상대감도

4% 정도 밖에는 느낄 수 없다. 식물의 광합성과 형태형성은 청색광, 적색광 및 원적색광에 반응하기 때문에 식물에서는 인간이 느끼는 밝기 단위를 사용하지 않는다.



〈그림 2-10〉 광합성과 광형태형성에 관여하는 방사 파장역과 명칭



〈표 2-2〉 인공광원별 광강도 환산계수

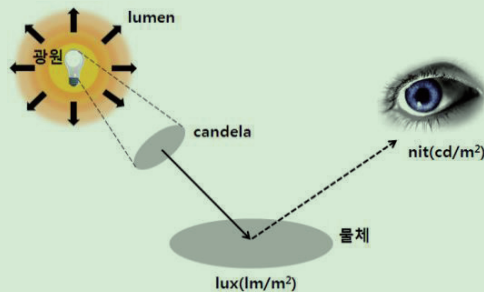
광원	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} / \text{W}$	$\text{lx} / \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} / \text{lx}$
	400~700nm	400~700nm	400~700nm
태양광	4.57	54	4.05
고압 나트륨램프	4.98	82	2.45
메탈헤라이드램프	4.59	71	3.06
형광등	4.59	74	2.94
백열등	5.00	50	4.00

(Takatsui M, 2011년)

♣ 빛의 세기

빛의 세기는 단위시간에 단위면적에 전달되는 에너지의 양, 즉 $[W/m^2] = [J/(s \cdot m^2)]$ 또는 광양자(Photon) 수로 나타내며 광원의 총출력은 W(와트)로 나타낸다. 그러나 같은 에너지의 빛이라도 파장에 따라, 눈의 감도에 따라 시각적인 밝기는 다를 수 있다.

- 인간의 눈은 전자기 광선의 스펙트럼에서 극히 일부분인 380~780nm의 가시광선의 범위를 인식할 수 있다.



- 빛의 단위
 - 광도(Luminous Intensity)
 - 광원으로부터 일정한 방향으로 발산되는 가시광의 세기
 - 단위 : [cd] – (candela : 칸델라)
 - 광속(Luminous Flux)
 - 광원에서 단위시간당 발광하는 가시광의 총량
 - 단위 : [lm] – (lumen : 루멘)
 - 조도(Illuminance)
 - 광원으로부터 어떤 특정한 수직 또는 수평평면에 비치는 단위 면적의 밝기
 - 단위 : [lx] – (lux : 룩스)
 - 휘도(Luminance)
 - 빛을 발하거나 반사하는 표면에서 복사되는 빛의 밝기
 - 단위 : [nit] – (nit : 니트)

예를 들어 인공광원으로 형광등을 사용하는 경우, 형광등 광강도가 1만 lx일 때 여기에 상당하는 광량자속밀도는 74로 나누면 $135\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이 되고 일사량은 $29.4\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 이 된다.

빛은 식물의 광합성을 유도하는 에너지로, 환경변화의 신호 역할을 한다. 식물 생장을 위해서는 보상점(광합성으로 생기는 산소의 양과 호흡에 의해 소모되는 산소의 양이 같은 때의 광도) 이상의 빛 세기(광강도)가 필요한데, 광포화점까지는 빛 세기(광강도)가 높을수록 광합성 속도는 높아진다. 빛이 환경변화의 신호로 작용하는 경우 광합성에 필요한 빛 세기(광강도)에 비해 낮은 빛 세기(광강도)에서 식물의 성장반응이 유도되고 이때 특정 파장역의 빛이 관여한다.

나. 명암주기

낮(명기)과 밤(암기)의 길이는 지구의 자전에 의해 연주기로 바뀌며, 식물은 밤(암기)의 길이를 인지하여 다양한 성장반응의 시기를 결정한다. 명암의 주기에 의해 식물의 응답반응이 결정되는 현상을 광주성이라고 한다.

일장^{v1}에 대한 반응은 식물마다 차이가 있다. 단일식물은 한계일장^{v2}보다 짧은 조건에서는 개화가 빨라지지만 장일^{v3}조건에서는 개화가 늦어지거나 영양생장만 계속한다. 예를 들어, 국화에서 추국이나 동국의 경우, 늦여름이나 초가을에 일장시간이 짧아지면 꽃눈(화아)이 분화한다. 장일식물은 한계일장보다 짧은 단일상태에서는 영양생장을 계속하고 장일조건에서는 꽃을 피우고, 열매를 맺는다. 장일식물에는 상추, 시금치, 무, 감자와 같이 여름철에 꽃 피는 식물이 속한다.

Tip.

v1 일장

1일 24시간 동안 낮과 밤의 비율

v2 한계일장

작물의 생육이 일장의 영향을 받을 때 생육에 영향을 줄 수 있는 일장의 한계. 임계일장이라고도 한다.

v3 장일

일장이 12~14시간 이상(보통 14시간 이상)일 때, 낮이 밤보다 긴 때를 장일이라고 한다.

다. 빛의 색(광질)

빛의 색(광질)은 파장별 광양자 또는 에너지 분포를 의미한다. 빛의 색(광질)은 광합성과 형태형성에 관여하여 재배작물의 양적 성장뿐만 아니라 그림 <2-11>과 같이 질적 성장(비타민, 당, 페놀 등의 유용물질)과 관련된 식물의 반응을 유도한다. 식물공장에서 이용하는 인공광원의 광질을 정확하게 측정하는 데에는 많은 경비가 소요되기 때문에, 광질과 식물반응에 대한 연구를 위해서는 LED와 같이 특정 파장의 색을 발광시키는 광원을 이용하는 것이 보편적이다.



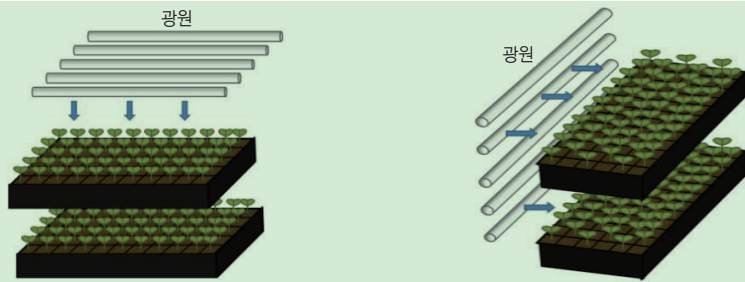
〈그림 2-11〉 식물생장과 빛의 색(광질) 관계

(Okazaki S, 2009년)

라. 광조사 방향

광조사 방향은 인공광 식물공장에서 빛을 효율적으로 쪼이기 위해 고려해야 할 요인이다. 식물공장에서 빛 쪼임(광조사)은 위에서 아래로 쪼이는 하향조사가 일반적이지만, 옆면에서 빛을 비추면 식물의 줄기생장을 조절할 수 있다. 〈그림 2-12〉

옆면에서 쪼이는(측면조사) 빛에너지가 윗잎, 중간잎, 아랫잎까지 도달하기 때문에 광원에서 쪼이는 빛에너지 이용 효율이 높아 식물체당 광원수를 감소시킬 수 있다. 그러나 광원의 옆면에서 쪼이는 것(측면조사)은 하향조사에 비해 줄기(초장)가 짧아지고 윗잎이 작아지며 아랫잎이 커지기 때문에 재배용보다는 육묘용 재배에 적합하다.



〈그림 2-12〉 광조사방향에 따른 광원 배치

마. 광수용체

식물 생장은 특정 파장역의 빛을 흡수하는 각종의 광수용체가 빛을 수용하면서 시작된다. 지금까지 알려진 고등식물의 광수용체(단백질)의 특징과 성질은 〈표 2-3〉과 같다. 광수용체는 빛을 지각하는 색소가 결합하는 부위와 수용한 빛을 신호로 하여 변환·이용하는 부위로 구성된다. 광수용 단백질은 분자종이 다양하고, 각각의 분자종은 관여하는 생리반응이 다르며 작용하는 빛의 색(광질)과 빛의 세기(광강도)도 다르다. 또한 각각의 광수용체는 단독으로 작용하지 않고 상호작용하여 식물의 성장반응을 조절한다. 광수용체는 특정 파장역의 빛을 흡수하며, 식물의 꽃눈 형성, 마디사이(절간) 자람(신장) 및 잎의 성장 등 식물의 반응은 특정 파장역의 빛에 의해 유도된다.

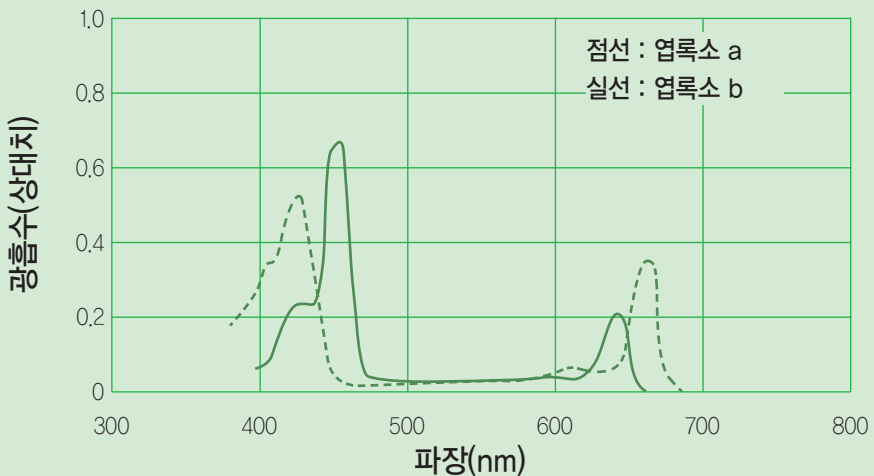
☔ 〈표 2-3〉 식물 생장단계별 유효 광수용체

생장단계	작용	유효 파장	작용 광수용체
싹트기(발아)	발아유도 발아억제	원적색	파이토크롬
영양생장	생장조절(세포분열 및 자람)	청색	크립토크롬
	형태형성	원적색	파이토크롬
	굴광성	청색	크립토크롬
	기공열림	청색	
	엽록체 운동	청색	
생식생장	화아형성	원적색	파이토크롬
		청색	크립토크롬
노화	색소합성	원적색	파이토크롬
		청색	크립토크롬

바. 빛과 식물반응

1) 식물 성장

식물 성장에 효과적인 파장역에는 생리적 유효방사(300~800nm)와 광합성 유효방사(400~700nm) 두 가지가 있다. 광합성 유효방사는 광합성유효광량자속이라고 부른다. 광합성에 유효한 빛을 흡수하는 색소는 광합성 색소라고 부르며, 가장 중요한 색소는 엽록소 a와 b이다. <그림 2-13> 엽록소 a는 주색소로 작용하며 보조색소인 b는 흡수한 빛을 엽록소 a에 전달하는 역할을 한다. 엽록소 a, b와 작용 스펙트럼의 절정에 가까운 파장은 적색과 청색역이다. 빛에 대한 식물의 작용은 빛의 색(광질)이라고 하는 광스펙트럼, 빛 세기(광강도), 빛을 쪼이는 시간(조사시간), 명암주기, 빛을 쪼이는 방향(조사방향) 등에 의해 달라진다.



<그림 2-13> 엽록소 흡수 스펙트럼

(Takatsuiji M, 2011년)

2) 광합성 작용스펙트럼

광합성에 관여하는 광수용체는 엽록소와 카로티노이드이며, 엽록소는 청색광과 적색광을, 카로티노이드는 청색~녹색광을 흡수한다. 그러나 식물종이나 빛의 색(광질), 빛의 강도(광강도)와 같은 빛의 조건에 따라서 광합성 작용스펙트럼은 크게 달라지며 식물의 다양한 성장반응을 유도한다.

3) 빛의 색(광질)과 줄기 자람(신장)

〈표 2-4〉는 인공광 조건에서 재배한 각종 원예식물의 파장별 줄기 자람(신장) 반응을 나타낸 것이다(Hirai, 2009년). 줄기 자람(신장) 반응은 청색광질에서 줄기 자람(신장)이 촉진되는 식물과 적색광질에서 촉진되는 식물로 분류된다. LED를 혼합하여 빛을 쪼일 때의 줄기 자람(신장) 반응은 단일광을 조사했을 때와는 다르게 나타난다.

 〈표 2-4〉 빛의 색(광질)에 따른 식물의 줄기 자람(신장) 반응

줄기 자람(신장) 비교	
청색광질 > 적색광질	청색광질 < 적색광질
가지, 해바라기, 메리골드, 고추, 브로콜리, 춘국, 장미, 샬비아, 페튜니아, 꽃도라지 등	무, 상추, 토레니아, 사과 대목, 후크시아, 피망, 시클라멘, 국화, 토마토, 대두, 금어초 등

(Hirai M, 2009년)

예를 들어, 페튜니아는 청색광질에 의해 줄기 자람(신장)이 촉진되지만, 청색광질과 원적색광질을 혼합하여 쬐면 단일의 청색광질에서보다 줄기 자람(신장)이 촉진된다. 그러나 청색광질과 적색광질을 혼합하여 쬐는 경우에는 줄기 자람(신장)이 억제된다. 아게라툼(풀솜꽃)의 줄기는 적색광질과 청색광질을 혼합하여 쬐면 자람이 억제되지만 원적색광질에 의해 현저히 촉진된다. 〈그림 2-14〉

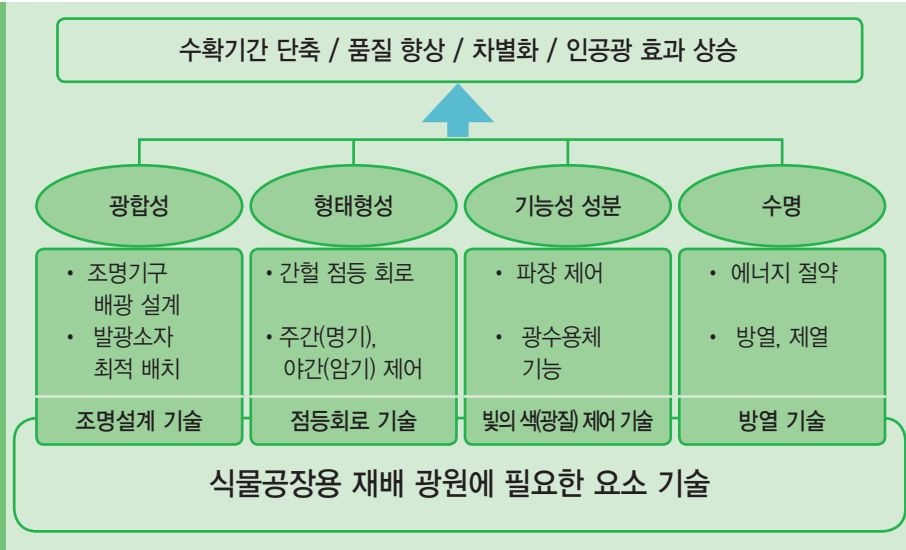


〈그림 2-14〉 빛의 색(광질) 제어에 따른 줄기 자람(신장) 변화

(Heo et al., 2009년)

인공광 아래에서 식물을 재배하는 식물공장 내 설정 빛의 세기(광강도)가 같을 경우, 식물의 형태는 빛의 색(광질)에 의해 달라진다. 특히 재배작물의 줄기 자람은 사용하

는 인공광원의 파장 영향을 받기 때문에 각 광원이 가지고 있는 빛의 색(광질)을 파악하여 광원을 선택해야 한다.



〈그림 2-15〉 식물재배용 인공광원 이용 기술

광원 종류와 특성

외부환경과 완전히 차단된 식물공장에서 식물을 재배하기 위해서는 자연광 대신에 발광다이오드(LED) 뿐만 아니라, 냉음극형광등(CCFL), 외부전극형광등(EEFL), 백열등, 형광등, 메탈할라이드램프, 고압 나트륨램프 등의 인공광원이 필요하다. 인공광원은 식물공장 내 식물 생산성, 상품성, 경제성 등을 고려하여 선정한다.

가. 형광등(Fluorescent Lamp)

형광등은 수명이 길고 램프의 효율이 메탈할라이드 램프와 거의 동등하며 광합성에 유효한 분광분포를 가지고 있어 실험용이나 재배용, 육묘용 광원으로 사용하고 있다. 형광등 수명은 6,000~1만 시간 정도이며, 가격이 저렴하고 빛의 세기(광강도)는 낮은 편이지만, 빛이 나는 부분의 면적(발광면적)이 넓고 가까이에서 빛을 쬌 수 있다(근접조사).

형광등이 빛나는 원리를 살펴보면, 1.5~2.7mm Hg의 저압으로 방전시키면 유리관 내의 전자가 수은원자와 충돌하여 파장 253.7nm인 자외선이 방사된다. 방사된 자외선은 형광방전관 안쪽 벽의 형광물질을 자극·통과하면서 사람의 눈으로 밝기를 느낄 수 있는 가시광 영역의 빛으로 바뀌어 형광방전관 밖으로 빛을 발하게 된다. 따라서 형광방전관 내 형광체의 종류에 따라 여러 종류의 분광방사를 얻을 수 있다.

식물 재배용 형광등은 가시광 영역을 많이 포함하고 있으나 적외선 및 자외선 영역이 적다. 식물의 엽록소 합성에 필요한 청색영역(450~470nm)의 파장대를 많이 포함하고 있다. 형광등은 식물의 상부에서 비교적 균일하게 빛을 아래쪽으로 분산시킬 수 있지만, 조명장치를 천장에 설치하여 아래로 쏘일 때에는 램프 특성상 등기구가 차지하는 점유율이 높아지는 단점이 있다.

형광등은 현재 소비전력 대비 빛에너지로의 전환율이 25% 정도로 효율 개선이 되고 있다. 특히 설치비용이 가장 저렴하며 가시광선 영역의 방사율이 높아서 식물공장의 광원으로 가장 널리 이용된다.

나. 고압 나트륨램프(High Pressure Sodium Lamp)

고압 나트륨램프는 나트륨 10kPa(약 0.1기압) 정도의 증기압 내에 발광시키는 광원이다. 발광관은 투광성 알루미늄이나 세라믹을 사용하고 관 내부에 나트륨, 수은, 크세논 가스 등을 주입한 램프이다. 램프 효율은 W당 100~140lm으로 효율이 높고, 수명은 1만~1만 2,000시간 정도로 길다. 이 램프는 광합성의 유효한 스펙트럼을 많이 포함하고 있다. 그러나 청색영역이 거의 없고 엽록소 합성, 떡잎(자엽)의 정상 전개에 필요한 스펙트럼이 부족하기 때문에 다른 광원과 조합하여 사용하는 것이 바람직하다.



〈그림 2-16〉 일본 TS사 인공광 식물공장



다. 메탈할라이드램프(Metal Halide Lamp)

메탈할라이드램프는 고압 나트륨램프나 고압 수은램프를 포함하는 HID(고휘도방전 램프)의 일종으로, 점등 중에 고압방전에 의해 빛을 내는 램프이다. 메탈할라이드 램프는 수은, 나트륨, 토륨, 인듐, 스칸듐 등의 금속을 요소와 화합시킨 할로젠화 화합물을 발광관 안에 주입한 램프이다. 빛의 세기(광강도)가 높아 전력소모량이 많고 가시광 영역을 많이 포함한다. 특히 적색광역을 많이 포함하고 있으며 청색광역이 적고, 기타 HID 램프에 비해 수명이 8,000~1만 시간 정도로 비교적 짧다. 방사 분포는 자연광과 유사한 방사 분포를 보유하고 있기 때문에 식물공장이나 생장실(Growth Chamber)과 같은 폐쇄된 공간에서 이용효율이 높은 광원이다.

라. 백열등(Incandescent Lamp)

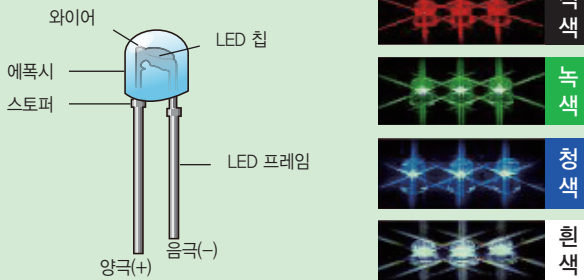
백열등은 필라멘트에 전류를 흘려 가열하여 빛을 내는 광원이다. 형광등이나 HID램프에 비해 효율이 낮지만 안정기가 불필요하고 점등이 용이하며 빛 세기(광강도)가 높다. 또한 빛 세기(광강도)를 제어하기 쉽고 가격이 저렴하다.

백열등은 자연광에 비해 적외선 영역의 스펙트럼을 많이 포함하고 있지만, 청자색(430~460nm) 등 광합성에 유효한 가시방사역이 적어 비효율적이다. 백열등은 형광등에서 부족한 적외선 영역을 보충하기 위하여 사용하는 것이 좋다.

마. LED(Light Emitting Diode, 발광다이오드)

LED는 전기 발광효과를 이용한 반도체 소자로, 순방향으로 전압을 가하였을 때에 빛을 낸다. LED 발광원리는 아래 위에 전극을 붙인 전도물질에 전류가 통과하면 전자(-)와 정공(+)이 결합할 때 에너지 차이에 해당하는 파장을 갖는 빛을 낸다.

LED가 방출하는 빛의 색을 결정하는 발광파장은 반도체 결정의 재료 및 농도 등에 따라 달라진다. 가시광역에서 LED가 방출하는 빛은 GaP, GaAsP, InGaN 등과 같은 화합물에서 각 원소의 배합 비율에 따라 색이 결정된다. <그림 2-17>



〈그림 2-17〉 LED 구조와 색깔

LED는 방출하는 빛의 종류에 따라 적외선 LED, 가시광선 LED 및 자외선 LED로 구분한다. 가시광선 LED는 전체 LED 시장의 90%를 차지하고 있으며, 적색, 녹색, 청색, 백색 LED 등이 있다.

LED는 다른 발광체에 비해 수명이 길며 열 발생이 적고 소비전력이 낮아 국내·외에서 인공광 식물공장 광원으로서의 이용성과 효과구명 연구에 이용되고 있다.

LED는 단색광을 만들 수 있고 광합성에 유용한 파장대의 단색광을 상호 조합하고 쪼여 광합성 효율을 높여 에너지를 절감한다. 〈그림 2-17〉

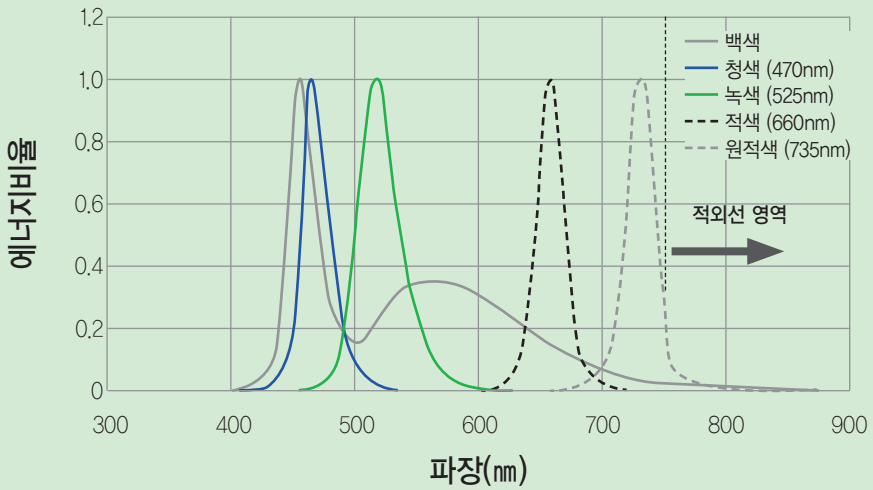
특히 적색광, 청색광, 백색광(혼합), 원적색 등의 광질을 혼합하면 비타민류, 안토시아닌 등 식물체 내 합성되는 유효성분 함량을 조절할 수 있다.

LED는 점등 시간에 구애를 받지 않기 때문에 간헐(Pulse)적으로 빛을 쪼일 수 있고 (간헐조사)를 할 수 있고, 구동전압을 조절하여 밝기조절(Dimming) 및 간헐적으로 빛을 쪼일 때 ON-OFF 비율(Duty Ratio)을 조절하여 여러 형태의 빛을 쪼일 수 있다는 장점이 있다.



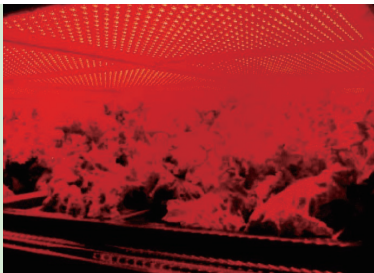
〈표 2-5〉 LED의 장·단점

장 점	단 점
1. 높은 광변환 효율(저소비전력) 2. 광원 및 시스템의 소형화, 박형화, 경량화 3. 고체반도체로 긴 수명(3만 시간 이상) 4. 환경 친화적(수은등 방전용 가스 불필요) 5. 빠른 점 · 소등(에열 불필요) 6. 안정적 직류 점등(펄스 동작) 7. 다른 색깔(파장) 조합 적용 가능	1. 한정적이고 좁은 배광각 2. 고휘도 눈부심 3. 발열에 의한 수명 단축 및 출력저하 4. 높은 가격 5. 적색 대비 청색, 백색 수명이 짧음 6. 적색의 가격이 다른 색에 비해 저렴하기 때문에 적색 위주로 사용하여 재배품목이 한정적



〈그림 2-18〉 LED 스펙트럼 분포

(Takatsuji M, 2011년)



일본 코스모플랜트 식물공장



농촌진흥청 식물공장

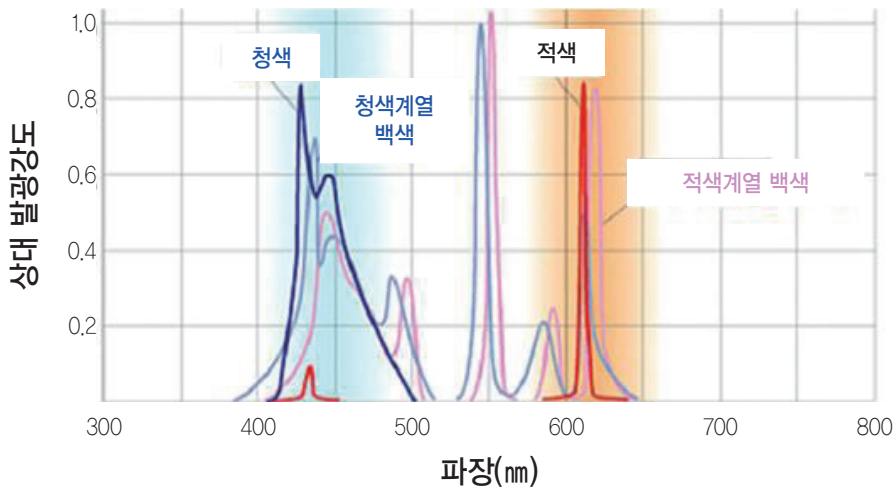
〈그림 2-19〉 LED를 이용한 식물공장 사례

식물은 기본적으로 광합성을 통해 성장하기 때문에 적절한 빛 세기(광강도)를 유지해 주는 것이 중요하다. 그러나 식물의 종류나 생리 상태에 따라서 적정 빛 세기(광강도)가 다르기 때문에 반드시 빛 세기(광강도)가 높을수록 성장에 좋은 영향을 미치는 것은 아니다. 식물 재배를 목적으로 하는 LED 광원은 인간을 대상으로 한 일반 조명과는 달리 광질이나 빛 세기(광강도) 제어 기술이 필요하다.

바. 하이브리드 전극 형광등(HEFL, Hybrid Electrode Fluorescent Lamp)

HEFL은 대형 액정 텔레비전에 배경조명으로 사용하는 냉음극형광등(CCFL), 외부전극형광등(EEFL)을 총칭하여 하이브리드 전극 형광등이라고 불린다. HEFL 조명시스템은 일본의 Advanced Agri.사에서 인버터와 포물선 형상의 반사판을 조합하여 농업용 조명장치로 완성시킨 것으로 HEFL로 상표 등록했다.

HEFL 조명시스템은 2007년부터 일본에서 채소재배 식물공장에 적용하고 있다. 국내에서는 태연친환경농업기술에서 Advanced Agri.사와 기술제휴, 해폴(HEFL)이라는 조명을 이용해 2011년부터 아이스플랜트를 생산하고 있다.

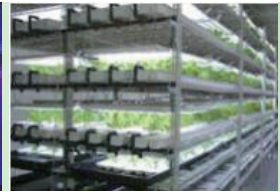


〈그림 2-20〉 HEFL 조명의 스펙트럼 분포

HEFL 램프는 수명이 길며 빛 세기(광강도)를 균일하게 유지할 수 있고, 청색, 백색, 적색, 녹색 등의 단일광질 및 적색과 청색의 혼합색 등 파장역에서 광질 제어가 가능하다. 또한 램프가 가볍고 얇아서 식물 가까이에서 빛을 쏘이는 것(근접조사)이 가능하기 때문에 다단 재배방식의 식물공장에 적합하다. HEFL 램프는 형광체를 달리하여 LED처럼 청백색계, 적백색계 등 광질 제어가 가능하다.



HEFL 조명



HEFL 램프 이용 식물공장 사례

〈그림 2-21〉 HEFL을 이용한 식물공장 사례

 〈표 2-6〉 광원별 특성 비교

특성	형광등(FL)	LED	하이브리드 전극 형광등(HEFL)
수명(hr)	6천~1만	2만~5만	3만~6만
효율	70~110 lm/W	50~80 lm/W	70~80 lm/W
표면온도	50℃	Power LED 이용 시 강제냉각 필요	30℃ (8개 등 이용 시)
비용(1일 1톤 생산공장의 m ² 당가비)	1	4	1.3~1.5
보수 램프 비용 (5년)	1(등 교환)	2(판넬 교환)	0.2(등 교환)
방출 파장색	백색	백, 청, 적, 녹색 등	백, 청, 적, 녹, 자색 등
기타	고효율 반사판 방수 대응	방열 장치 필요	

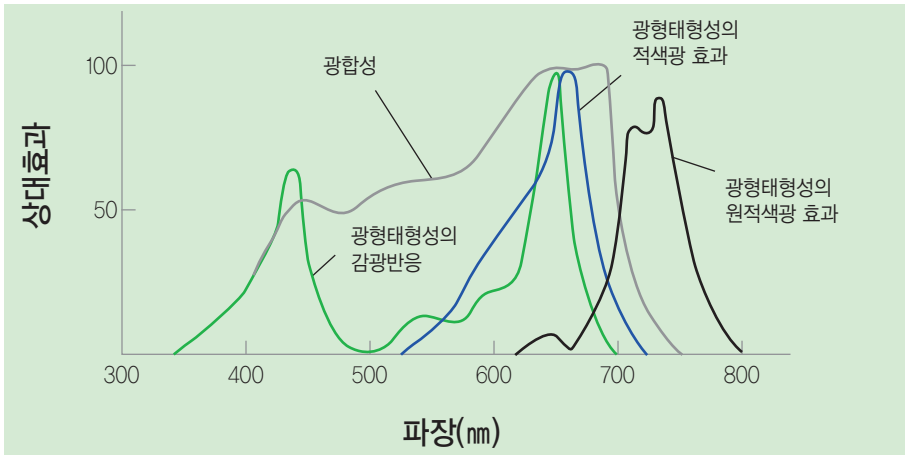
인공광 제어 기술

가. 빛에 의한 형태제어

빛이 없는 상태에서 식물을 재배하면 황백색을 띠고 잎이 퍼지지 않고 콩나물처럼 비정상적으로 자란다. 이 상태에서 형광등을 수분 동안 약하게 비추면 녹색을 띠며 줄기의 이상 자람(신장) 현상이 억제되며 잎이 퍼진다. 씨앗의 싹트기(발아), 꽃눈 형성, 색소 생성 등도 약한 빛에서 촉진되거나 억제되는 경우가 많은데, 이와 같이 광합성에 필요한 빛 세기(광강도)보다 약한 빛에 의해 식물생장이나 잎의 발달 형태가 달라지는 것이 형태제어이다.

식물의 빛반응 스펙트럼에서 보는 바와 같이 고등식물의 광형태형성 반응은 400~800nm 내 적색, 청색, 원적색광을 흡수하는 광수용체의 일종인 파이토크롬

(Phytochrome)을 매개로 하는 형태와 청색수용체인 크립토크롬(Cryptochrome)이나 포토트로핀(Phototropin)을 매개로 하는 형태가 있다. <그림 2-22>

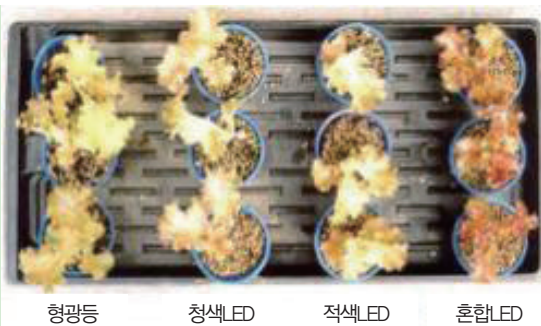


<그림 2-22> 식물의 광반응 스펙트럼

(Takatsuji M, 2011년)

나. 색소 및 성분 제어

엽록소 생성은 적색광과 청색광에 의해 촉진되지만 발달한 잎이나 노화된 잎의 엽록소 함량은 적색광보다 청색광에 의해 증가한다. 일반적으로 빛이 강할 경우에는 적색광에 의해 엽록소 함량이 떨어진다. 안토시아닌 합성은 청색이나 원적색 또는 파이토크롬 반응이 관여하며 광파장이나 명암주기, 빛을 쪼이는 시간(광조사 시간), 빛 세기(광강도) 등의 빛조건에 의해 변화한다. 식물 체내 색소제어는 식물이 가지고 있는 색소나 성분함량에 따라 다르며, 광환경 요인에 의해 영향을 받는다. 생장기간 중에 쪼이는 빛의 색(광질)이나 빛 세기(광강도) 제어에 의한 색소성분이나 기능성성분, 특히 안토시아닌, 플라보노이드, 폴리페놀과 같은 성분 변화 연구가 진행 중이다. 예를 들어, 상추나 비트의 경우 적색과 청색의 혼합 LED를 조사하여 재배하면 단색광보다 안토시아닌 함량이 증가한다. <그림 2-23>



〈그림 2-23〉 광질에 의한 상추와 비트의 색소 형성

(Heo et al., 2002년)

다. 효과적인 광질 제어 방법

1) 품종 선택

식물공장 내 재배 가능한 식물종은 다양하지만, 품종의 차이에 따라 빛의 색(광질)에 대한 식물의 생장이나 개화반응이 달라지기 때문에 재배식물별 광질의 작용을 검토할 때에는 다수 품종을 공시하여 비교·검토한 후에 품종을 선택한다.

2) LED 램프 선택

빛의 색(광질)을 고려하여 빛을 쏘일 때(광조사) 광수용체의 흡수 피크파장에 맞추는 것이 효과적이다. 그러나 피크파장 부근의 광만이 작용을 하는 것이 아니라 피크에서 벗어난 파장역의 빛 또한 생장반응을 유도한다. 현재 LED 소자의 소재가 다양해지고 있으며, 다양한 피크파장을 나타내는 LED가 시판되고 있어 목적에 따라 적합한 LED 램프를 선택할 수 있다. 효과적인 LED 식물공장 조명설계를 위해서는 일정 재배면적 내 필요한 빛 세기(광강도)를 예측한 후, 재배 단수에 적합한 LED 패널수를 고려해 조명설치 개수를 결정한다.

3) 광이용 목적 결정

적색광질, 청색광질 및 원적색광질의 혼합광을 조사할 때 혼합비율이나 이들 단색광의 상호조합에 의해 식물의 생장이나 꽃이 피는 반응이 달라진다.

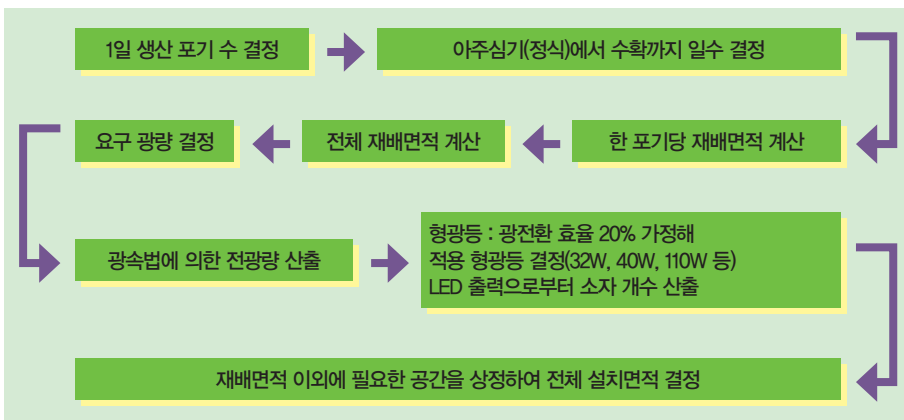
LED를 주 재배광원으로 이용할 때 LED의 출력이 문제가 된다. 앞에서 쓴 것과 같이 냉음극형광등(CFL)이나 외부전극형광등(EEFL)과 같은 광원은 형광체의 종류에 의

해 다양한 광질을 조사할 수 있으며, 이들 광원은 LED보다 재배면적이 크면 사용하기 적합하다. 또한 이들 광원을 목적에 따라 조합하여 이용할 수도 있다. 신호 역할을 위해 빛을 쪼일 때 서로 다른 광질을 혼합하거나 효율적으로 혼합비율을 제어하기 위한 광원의 모듈설계를 검토해야 한다.

4) 조명설계

광질제어는 재배를 목적으로 하는 빛인지, 시그널을 이용한 야간조명을 위한 빛인지에 따라 빛의 색(광질) 작용이 달라진다는 것에 유의해야 한다.

- 식물공장의 조명 설계에 있어서 우선 식물의 정상적인 생육을 위해 필요한 빛 강도(광강도)를 결정한다(상추의 경우 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).
- 재배 대상 식물의 재배면적에 대해 필요한 설치 개수와 필요전력을 계산한다.
- 대상광원의 조사면적 $A(\text{m}^2)$, 광강도 $I(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$, 광원보수율 M , 조명률 U 에 의해 필요한 광속을 $F = AI/MU$ 로 구할 수 있다(여기서 보수율(M)은 0.55~0.85, 조명률(U)은 최대 1, 새로 설치 시 MU 0.8가정).



〈그림 2-24〉 조명설계 순서



♣ 조명설계 예

- 가정 : 1일 1,000포기 생산, 재배일수 20일, 상추 1포기당 재배면적 0.0025m²
 - 전체 재배 면적 = 0.0025m²/주 × 20일 × 1000주 = 450m² 이며,
 - 식물공장은 육묘실, 기계실, 관리실, 작업장 통로 등이 있으므로 650m² 정도 필요
 - 4단 재배를 하는 조건으로 계산하면, 1단은 450/4=112m²
- 상추재배에 필요한 전광량자속 $F = 450\text{m}^2 \times 150\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} / 0.8 = 84,375 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 이 필요. 적색과 청색의 비율을 4:1로 적용할 경우
 - 적색 (660nm) LED 1W짜리를 사용할 경우 $5.523\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 에 해당하므로 $84,375 \times 0.8 = 67,500\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 이 적색으로 커버하는 광속이 되며 다시 이를 5.523으로 나누면 1만 2,221개 정도의 적색 LED 소자가 필요하게 된다. 또한 청색 (470nm) LED 1W짜리를 사용할 경우 $3.933\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 에 해당하므로 $84,375 \times 0.2 = 16,875\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 이 청색으로 커버하는 광속이 되면 다시 이를 3.933으로 나누면 4,290개의 청색 LED 소자가 필요하게 된다.
 - 32W 형광등을 사용할 경우 $84,375 / (4.59 \times 32) = 574.4$ 에 해당하므로 32W 형광등 575개가 필요하게 된다.
 - ※ 형광등 1W당 $4.59\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 가정

인공광 이용

가. 식물공장 경영 시 유의점

식물공장 실용화를 위해서는 식물공장 초기 설치비를 낮추어 감가상각비를 절감시켜야 한다. 인공광 식물공장의 경우, 조명설비 비용 절감과 조명효율 향상이 중요하다. 현재 단계에서는 저렴한 형광등을 이용하거나 반사판 최적 설계, 형광등에 부족한 적색 파장역 강화를 위해 적색을 낼 수 있는 광원과 함께 비추는 것이 효과적이다. 또한 식

물공장에서 고부가가치 농산물을 생산할 뿐만 아니라 생산물을 높은 가격에 판매할 수 있는 유통 관련 노력도 중요하다.

〈표 2-7〉에서 보는 것처럼 식물공장에서 생산된 작물이 무농약으로 재배됐고, 청결하다는 것만으로는 시장성을 높이는 데에 한계가 있다. 따라서 식물공장 재배 작물에 대한 소비자의 선호도를 향상하기 위하여, 양적인 성장뿐만 아니라 맛도 좋고 기능성 성분도 증가시키는 등 질적인 측면을 향상시키기 위한 연구개발이 필요하다.

 〈표 2-7〉 식물공장 채소에 대한 소비자와 생산자의 인식 차이

소비자	생산자
• 왜 가격이 비싼가? • 어디서 판매하는가? • 무엇이 좋은가? • 인공적인 느낌이 불안하다. • 영양가가 낮지는 않은가? • 다른 상품과 식별이 어렵다. • 사람이 먹는 채소인가? • 무농약인가? • 왜 상자나 비닐 포장에 되어있나?	• 신선도와 맛에 신경을 쓴 채소다. • 맛있고 안전한 차세대 미래 채소다. • 씻지 않아도 되고 단맛이 있는 안전한 채소다.

(Takatsuji, 2011년)

나. 광원 이용의 고효율화 및 식물공장 경영

인공광 식물공장의 경영 효율성을 향상하는 방법의 하나는 광원의 효율을 증대시키는 것이다. 광원의 고효율화는 식물공장 내 재배 식물에 쏘이는 광원 1개당 빛 세기(광강도)가 높고 재배 중인 각 식물에 쏘이는 빛 세기(광강도)가 균일하다는 것을 의미한다.

인공광 식물공장에서 광원의 효율을 높이는 방법은 다음과 같다. 첫째, 낮은 비용의 심야 전력을 이용한다. 둘째, 재배일수를 단축하여 출하 회전수를 늘린다. 셋째, 균일한 빛 쏘임(광조사)을 통해 재배효율을 높인다.

특히 다단식 식물공장은 가까이서 빛을 쏘이는 방법(근접조명)이 주를 이루고 있는데, 형광등을 같은 간격으로 배치하는 것만으로는 많은 수의 형광등을 설치하지 않는 한 잎채소(엽채)의 광합성에 필요한 빛 세기(광강도)를 확보하기 어렵다. 또한 재배 베드의 통로 측으로 유실되는 빛이나 형광등 양 끝 부분에서의 빛 세기(광강도) 저하로 빛 세기(광강도)의 강약이 발생해 식물체의 성장 불균형을 초래한다. 공간 이용성 면

에서 형광등의 설치 개수가 제한될 뿐만 아니라, 빛 세기(광강도)를 확보하기 위해 램프 개수를 늘리는 경우 소비전력이 증가하고 램프에서 발생하는 열에 의해 재배 베드(Bed)의 온도가 상승한다. 온도가 상승하면 실내 공조부하가 증가하여 생산원가 상승에 직접적인 영향을 미치기 때문에 인공광 식물공장 경영은 광원과 관련된 에너지 절약형 설계가 중요하다.

광원의 효율을 높이기 위해 고정식 재배시스템에서는 광원의 높이를 조절할 수 있는 장치를 설치하는 것이 좋다. 식물이 덜 자라 키가 작을 때는 인공광 높이를 낮춰주고, 식물이 자랄수록 광원의 높이를 올려 주는 것이 필요하다.

잎채소류(엽채류) 식물공장은 전력비용을 최소한으로 억제하면서 건전한 식물을 재배하기 위해서는 **광보상점^{v1}**을 웃도는 범위 내에서 빛 세기(광강도)를 확보해 1일당 10시간 기준으로 빛을 쪼이고, 가능하면 심야전력을 이용하여 낮에는 광원을 차단하는 것이 바람직하다.

인공광 식물공장에서 LED를 광원으로 하여 처음 재배한 작물은 상추이다. 이른 시일 안에 크기가 큰 상추를 재배할 목적으로 광합성 반응에 유효한 적색광을 쪼이면 쓴맛이 줄고 단맛이 강한 상추를 재배할 수 있다. 인공광 조건에서 재배한 상추의 영양성분을 조사해 보면 당분 이외에 카로틴, 비타민 등이 전체적으로 증가하는 경향을 나타내는데, 특히 비타민 A는 노지에서 재배한 결구상추에 비해 수배에서 수십 배 정도 증가한다. <표 2-8>

 <표 2-8> LED 식물공장 내 상추의 성분분석표

기능성 성분	온실재배	LED 식물공장 재배	비율
카로틴(mg/100g)	0.13	1.79	13.70
비타민 A(IU/100g)	70.00	990.00	14.10
비타민 C(mg/100g)	6.00	11.00	1.80
토코페롤(mg/100g)	0.30	1.3	3.30

(Takatsuji, 2011년)

Tip.

v1 광보상점

광합성 속도와 호흡 속도가 같아지는 점. 식물에 의한 이산화탄소의 흡수량과 방출량이 같아져서 식물체가 외부 공기 중에서 실질적으로 흡수하는 이산화탄소의 양이 0이 되는 빛의 강도



〈표 2-9〉 식물공장 내 광원 이용 연구 사례

시험작물	재배광원 및 빛의 색(광질)	재배조건	작물반응
적촉면상추	○ HEFL : 적색, 청색, 분홍색 및 백색	○ 품종 : 롤로로사 ○ 빛 세기(광강도) : $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 16시간 ○ 재배기간 : 40일	○ 적색광 : 잎 생장 촉진(적색광 대비 40% 증가), 줄기연약, 잎 탈색 ○ 청색광 : 적색광 대비 잎색 유지, 줄기 자람(신장) ○ 분홍색광 : 전체적 생장 양호 ○ 백색광 : 폴리페놀 증가
	○ LED : 적색, 청색, 적 + 청색	○ 품종 : 자주 ○ 빛 세기(광강도) : $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 16시간 ○ 적 + 청 혼합비 : 1:1 ○ 재배기간 : 10일	○ 청색광 및 혼합색광 : 마른 무게(건물중) 증가 ○ 혼합색광 : 안토시아닌 색소, 단백질 증가
딸기	○ LED : 적색, 청색, 적 + 청색	○ 품종 : 장희 ○ 빛 세기(광강도) : $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 16시간 ○ 재배기간 : 28일	○ 적색광 : 줄기(초장) 생장 촉진, 엽록소 합성 억제 ○ 청색광 : 줄기(초장) 생장 억제, 엽록소 합성 억제
절화장미	○ 적색 LED	○ 품종 : 레드 산드라 ○ 빛 세기(광강도) : $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 16시간	○ 꽃잎 전개 촉진 ○ 절화 감상기간 : 선도보존제 처리와 유사 ○ 꽃목굵음 현상 억제
매리골드	○ 형광등 + LED : 적색, 청색, 원적색 LED	○ 품종 : 오렌지 보이 ○ 빛 세기(광강도) : $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 16시간 ○ 재배기간 : 70일	○ 청색광 : 줄기 자람(초장 신장) 촉진, 꽃눈(화아) 형성 억제, 꽃 피는 기간 단축 ○ 형광등 + 원적색광 : 기공수 증가 ○ 형광등 + 적색광 : 줄기 자람(초장 신장) 억제, 꽃눈(화아) 형성 촉진/꽃 피는 기간 연장
절화카네이션	○ 적색 LED	○ 품종 : 마스터 ○ 빛 세기(광강도) : 상동 ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 상동	○ 꽃잎 전개 촉진 ○ 절화 감상기간 : 선도보존제 처리와 유사



샬비어	○ 형광등 + LED : 적색, 청색, 원적색 LED	○ 품종 : 레드 비스타 ○ 빛 세기(광강도) : $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 16시간 ○ 재배기간 : 70일	○ 형광등 + 원적색광, 청색광 : 줄기 자람(초장 신장) 촉진 ○ 적색광, 청색광 : 꽃눈(화아) 형성 억제 ○ 형광등 + 적색광 : 꽃 피는 기간 연장, 기공수 증가
아게라툼	○ 혼합 LED : 적 + 청색, 청 + 원적색, 적 + 원적색 LED	○ 품종 : 블루 필드 ○ 빛 세기(광강도) : $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 16시간 ○ 재배기간 : 28일	○ 청 + 적색 : 생장 촉진, 잎수 증가, 줄기 자람(신장) 억제, 꽃 피는 수 증가 ○ 적 + 원적색 : 줄기자람(신장) 촉진 ○ 청 + 원적색 : 꽃눈(화아) 형성 촉진
호접란	○ LED : 적색, 청색, 적 + 청색	○ 재료 : 호접란 유묘 ○ 빛 세기(광강도) : $70\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 16시간 ○ 재배기간 : 56일	○ 청색광/혼합색광 : 생장 촉진 ○ 혼합색 : 카로티노이드 성분 증가 ○ 적색광 : 잎 내 전분합성 억제 ○ 혼합색 : 엽록소 합성, 잎 내 글루코오스 합성 촉진
시클라멘	○ LED : 적색, 청색, 적+청색	○ 품종 : 딕시 화이트 ○ 빛 세기(광강도) : $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 10~12시간 ○ 적 + 청 혼합비 : 1:1 ○ 재배기간 : 63일	○ 혼합색 : 꽃눈(화아)수 증가, 꽃 피는 기간 연장 ○ 청색광 : 꽃눈(화아)형성 억제, 꽃 피는 수 감소 ○ 적색광 : 꽃대 자람(화경 신장) 촉진
페튜니아	○ 메탈헤라이드(MH), 고압 나트륨램프(HPS) ○ LED : 적색, 청색	○ 품종 : 바카라블루 ○ 빛 세기(광강도) : $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 14시간 ○ 재배기간 : 30일	○ HPS램프 : 줄기 자람(신장) 억제로 인한 키작음(왜화) 발생(MH나 청색광 대비 30%)

양배추	○ LED : 청, 청+녹, 녹, 적색 ○ 형광등	○ 품종 : 금춘 ○ 빛 세기(광강도) : $150\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사)광조사 시간 : 16시간 ○ 적+녹 혼합비 : 1:1 ○ 재배기간 : 30일	○ LED 빛의 색(광질) : 지상부 생체중, 잎 수(엽수) 및 잎몸(엽신)에 빛의 색(광질) 차이 나타나지 않음 ○ 청색광 : 잎자루(엽병) 자람(신장) 촉진 ○ 적색광 : 잎자루(엽병) 자람(신장) 억제 ○ 형광등 : 안토시아닌 합성 촉진
들깨	○ 형광등 + LED : 청색, UV	○ 품종 : 적들깨 ○ 빛 세기(광강도)광강도 : $150\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사)광조사 시간 : 16시간 ○ 적+녹 혼합비 : 1:1 ○ 재배기간 : 21일	○ 형광등 + 적색광 : 자연광 및 기타 광질 대비 폴리페놀, 안토시아닌 합성 촉진, 생체중 증가
보리	○ LED : 적, 적+청	○ 빛 세기(광강도) : $500\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 16시간 ○ 적 + 녹 혼합비 : 1:1 ○ 재배기간 : 20일(영양생장기)	○ 적색광 : 지상부 마른무게(건물중) 증가, 자람(신장) 생장 촉진
토마토	○ LED : 적색, 청색, 적+청색	○ 품종 : 모모코 ○ 빛 세기(광강도) : $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 16시간 ○ 적 + 청 혼합비 : 7:3 ○ 재배기간 : 17일	○ 적색광 : 생장 촉진 ○ 청색광 : 줄기 자람(신장) 촉진, 잎 탈색 ○ 혼합색광 : 생장 촉진, 줄기 안토시아닌 색소 합성
감자	○ 고압 나트륨램프 (429 W)	○ 품종 : 조생백 ○ 빛 세기(광강도) : 2.4 m 높이에서 $700\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ○ 1일 빛 쏘임(광조사) 시간 : 16시간 ○ 재배기간 : 100일	○ 10a당 덩이줄기(괴경) 수확량 : 약 19.8톤 (포장 수확량 3.4톤)

4 공기조화

공조(공기조화)란 실내 온도, 습도, 기류 속도, 가스 조성이나 가스농도, 먼지 및 불순물 제거 등을 공조의 목적에 맞도록 조정하는 것이다.

식물공장에서의 공기조화는 온도, 습도, 풍속 등의 공기환경과 배지와 배양액의 지하부 환경을 적절히 조절하는 것을 말한다. 식물 생장에는 최적의 공기환경과 배지환경이 필요하므로 비용을 포함한 적절한 공조가 중요하다.

인공광 식물공장에서 공기조화는 빛 쏘임(광조사)과 더불어 환경 및 생육의 모니터링을 기초로 하여 고도의 환경제어와 생장조절을 통해 식물의 주년·계획생산이 가능하도록 해준다.

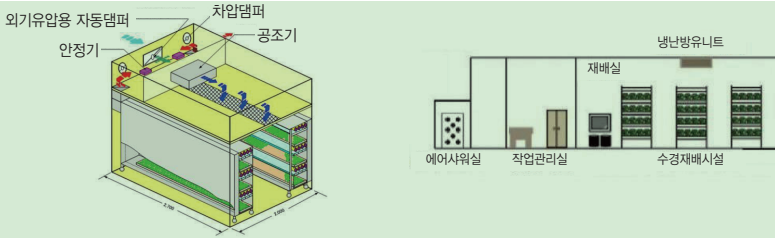
식물공장의 환경요인에는 온도, 습도, 이산화탄소(CO₂) 농도, 기류 속도, 잡균 제어, 해충 침입방지 등이 있지만, 이 모든 요인을 동시에 제어하기는 어렵기 때문에 유의가 필요하다. <표 2-10>

 <표 2-10> 식물공장의 공조 제어내용

제어항목	제어방법
- 온도 - 습도 - 이산화탄소(CO₂) 농도 - 기류 속도 - 잡균 발생 - 해충 침입	- 난방, 냉방, 환기, 차광, 지붕 살수 - 가습, 제습 - 이산화탄소(CO₂) 사용 - 탱크배관, 풍량 - 필터, 공기청정기, 자외선 - 필터, 방충망

식물공장의 공조에서는 냉방부하가 난방부하보다 더 크다. 공조부하의 대부분은 광원에서 발생하는 열에너지에 의한 온도상승을 억제하기 위한 냉방부하이다. 인공광 식물공장에서는 조명 중(명기)에는 램프로부터의 발열이 크다. 따라서 겨울철에도 냉방이 필요하다. 야간(암기) 기온은 통상 식물의 호흡으로 말미암은 에너지 소모를 억

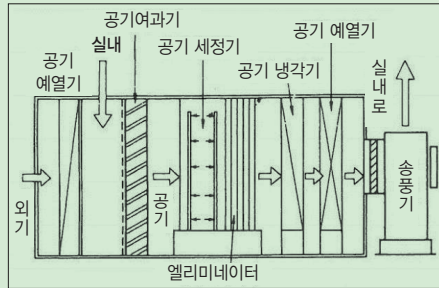
제하기 위해서 낮(명기)보다 낮게 설정한다. 이 때문에 여름철에도 야간에 냉방이 필요하다.



〈그림 2-25〉 인공광 식물공장의 공조시설 예

공기조화기(Air Handling Unit : AHU)

공기조화기는 실내·외 공기를 빨아들여(흡입) 냉방, 난방, 가습 등 공기상태를 조정하여 내보내는 장치이다. 공기조화기는 용도에 따라 형태나 기능 및 용량이 다양하다. 근래의 공기조화기는 냉방, 난방, 환기, 습도조절, 공기정화 기능을 내장하여 고도의 공기조화가 가능하고 완전히 독립된 개별 냉·난방도 가능하다.



〈그림 2-26〉 공기조화기 구조

(《건축용어사전》, 현대건축관련용어편찬위원회, 2011년 1월 5일, 성안당)

공기조화기는 열의 분배방법에 따라 일반적으로 중앙식과 개별식으로 나눌 수 있다. 중앙식은 일반적으로 중앙기계실에 열원인 냉동기와 보일러를 설치하고, 부가적으로 설치된 공조기를 이용하여 공기조화를 한다. 기계실 내에 공조기를 설치하여 조화된 공기를 덕트를 통해 각 방으로 유도하는 형식이 일반적이다. 또한 공조기가 기계실에 집중되어 있어 관리가 편리하고 규모 큰 건물에서는 설비비가 적게 든다. 그러나 구역

마다 조정이 곤란하며 개별식에 비해 더 많은 덕트 공간이 필요하다.

개별식은 에어컨과 같이 압축기를 내장하고 있는 유닛을 필요에 따라 분산 설치하는 방식이다. 공기조화기의 대량생산이 가능하므로 설비비와 운전비가 저렴하고 개별제어가 가능하다. 빈 구역의 공조 정지가 자유로워 에너지 절약에 효과적이다. 개별식은 제조회사에서 조립, 완성하기 때문에 냉매 배관이 불필요하지만, 필터가 불완전해 실내의 청정도가 불량하고 소음이 큰 단점이 있다. 소규모 건물(사무실, 주택, 상점 등)이나 대규모 건물에서도 방마다 부하가 다른 경우에 적합하다.

공조기의 운전방식은 산업기술의 발달에 따라 하나의 덕트에 일정한 풍량을 보내는 방식, 각 실(층) 유닛방식, 팬 코일 유닛 방식, 패키지 방식, 유인방식, 개별공조 방식 등이 개발되어 다양한 방식이 적용되고 있다. 열을 운반하는 매체에 따라 전공기방식, 수공기방식, 전수방식으로 구분한다. <표 2-11>

수증기 및 냉매는 증발 잠열을 이용할 수 있어 보다 효율적인 열운반이 가능하고, 물은 공기보다 단위체적당 열 운반량이 비교적 크다. 따라서 공기 대신 물을 열매 체로 이용하는 것 열이용 측면과 덕트 공간 절약 측면에서도 유리하다. 최근에는 에너지 효율이 높은 지열 등 신재생에너지를 열원으로 이용하여 냉난방 성능이 우수한 히트펌프 시스템이 보급되고 있다.

 <표 2-11> 공조의 분류

설치 위치	냉열원의 종류	공조의 운전방식
중앙식	전공기 방식	• 단일덕트형 • 멀티존유닛형 • 2중덕트형 • 각층 유닛 방식 • 유인유닛 방식
	수공기 방식	• 팬코일 유닛 · 덕트병용 방식 • 복사냉난방 방식(차공기 병용식)
	전수 방식	• 팬 코일 유닛 방식 • 복사냉난방 방식
개별식	냉매 방식	• 팬 코일 유닛 방식 • 패키지형 유닛 • 룸에어컨디셔너

가. 전공기 방식(All Air System)

전공기 방식은 실내의 열을 공급하는 매체로 공기를 사용한다. 외기와 실내 환기의 혼합공기를 공조기로 끌어들이 먼지를 제거한 후 열원장치에서 만든 냉수와 증기를 냉풍으로, 온수를 온풍으로 열교환시켜 덕트를 통해 실내로 송풍하는 방식이다. 외기를 도입하면 이산화탄소(CO₂), 세균, 냄새의 희석과 산소공급 등 공기정화에 효과적이다. 대체로 인공광 식물공장 내 사무실이나 회의실과 같이 사람이 많이 모이는 장소에는 많은 양의 외기를 필요로 하므로 전공기 방식이 효과적이다.

[장점]

- 청정도가 높은 공조, 냄새제어, 소음 제어에 적합하다.
- 중앙집중식으로 운전, 보수관리를 집중화할 수 있다.
- 공조구역에는 배기 배관, 공기 여과기 또는 전원이 필요 없다.
- 외기 냉방이 가능하다.
- 배열회수장치 이용이 쉽다.
- 많은 배기량에도 적응성이 높다.
- 겨울철 가습이 용이하다.

[단점]

- 덕트 치수가 커지므로 설치공간이 크다.
- 구역별 공기균형 유지를 위한 기구가 필요하다.
- 송풍동력이 커서 반송동력도 크다.
- 대형 공조기계실이 필요하다.

나. 수공기 방식(Water Air System)

수공기 방식은 열운반의 수단으로 물과 공기 둘 다 사용하는 방식이다. 열원 장치로부터 냉수, 온수 또는 증기를 실내에 설치된 열교환 유닛에 보내어 실내공기를 가열 또는 냉각하거나 조화된 공기를 실내로 송풍한다.

팬 코일 유닛과 덕트 배관이 동시에 필요하므로 구조가 복잡해지지만, 덕트 공간 및 운송동력을 줄일 수 있으며 부하변동에 효과적으로 대응할 수 있다. 냉풍-온수 또는 온풍-냉수와 같이 냉·온의 양쪽 매체를 조합 사용할 수 있어 복열원방식으로 개별제어가 가능하다. 에너지 소비 측면에서 수공기 방식이 전공기 방식보다 유리하다. 사무



소 건물에 일반적으로 적용하고 있다.

[장점]

- 부하가 큰 구역에도 덕트 치수를 줄일 수 있다.
- 전공기 방식보다 운송동력이 적다.
- 부하변동에 효과적으로 대응한다.
- 유닛별로 제어하면 개별제어가 가능하다.

[단점]

- 유닛에 고성능 필터 사용이 불가하다.
- 필터의 보수, 기기점검이 증대되어 관리비가 증가한다.
- 실내기를 바닥 위에 설치하면 바닥 유효면적이 줄어든다.
- 수배관을 이용하기 때문에 누수의 위험이 있다.

다. 전수 방식(All Water System)

전수 방식은 열운반의 수단으로 물을 사용하는 방식이다. 온수 또는 냉수를 각 방에 있는 팬 코일 유닛에 공급하여 냉·난방한다. 물은 열운반 능력이 공기보다 우수하고 배관 공간을 절약할 수 있다. 팬 코일 유닛에만 쓰는 방식으로 덕트에 의한 송풍은 없다. 실온제어가 가능하나 누수의 위험성이 있으며 외기 도입이 어렵고 주로 공동주택, 단독주택, 외기 도입이 가능한 사무실 빌딩 등에 채용한다.

라. 냉매 방식(Refrigerant System)

냉매로 실내의 공기를 냉각·가열하는 방법으로, 옥외의 공기나 물과 열교환 후 열을 배출 또는 흡수한다. 여름에는 냉매의 직접 팽창으로 실내 공기를 냉각·감습한다. 겨울에는 열펌프로 가열하는 방식과 다른 열원장치에서 만든 증기, 온수 또는 전열에 의해 가열하는 방식이 있다.

냉매 방식에는 송풍기, 코일, 냉동기 등의 전체기능을 케이스 속에 모은 방식(예, 룸에어컨)과 팬 코일 유닛을 실내의 설치하고 콘덴싱 유닛을 옥외에 설치하여 양자를 냉매 배관으로 접속한 스플릿(split)형(예, 패키지형 에어컨)이 있다.

[장점]

- 유닛에 냉동기를 내장하고 있어 부분운전이 가능하다(에너지 절약형).
- 부하증가, 증축 등으로 유닛 증설이 쉽다.
- 온도조절기를 내장하고 있어 개별제어가 가능하다.
- 취급이 간편하고 운전이 쉽다.

[단점]

- 유닛에 냉동기를 내장하고 있어 소음, 진동의 우려가 있다.
- 외기 냉방이 어렵다.
- 기기의 수명이 짧다.

공조 계획

공기조화 방식은 기능과 경제성, 에너지 절감, 장래 확장 계획 및 안정성, 공조대상 공간의 사용방법 등을 고려해서 결정한다. 공조방식을 계획하는데 조사해야 할 기본적인 사항은 다음과 같다.



〈표 2-12〉 공조 계획

기능면	경제면
• 온도의 개별제어는 가능한가? • 연간 공조를 할 수 있는가? • 상대습도 제어방법 • 환기 및 실내공기의 청정도 유지 • 소음, 진동	• 설비비 • 운전비 • 유지관리비 • 기계실의 필요면적

가. 공조방식의 선정

발아실, 육묘실, 재배실, 기계실, 휴게실 등의 주된 목적에 적합한 방식을 결정한다.

나. 구역(Zoning) 계획

공조설비에 있어서 건물 내를 몇 개의 구역으로 나누어 각 구역에 몇 개의 덕트(또는 냉온수관)를 설치하여 각기 희망하는 조건이 되도록 공기조화하는 것을 구역방식



(Zoning)이라 한다.

- 1) 구역 설정 : 공장 내부를 몇 개의 구역으로 나누어 각 구역에 별개의 덕트나 냉·온수관을 설치하여 각기 희망하는 조건으로 공기조화를 하는 것이다. 구역을 설정하고 구역을 구분하여 제어하면 운영비를 절약할 수 있다.
- 2) 부분공조 및 개별제어 : 육묘실, 재배실, 실험실 등의 용도에 따라 열용량이 다르므로 부분적 개별제어가 필요하다.

다. 열원설비

열원설비는 경제성(고정비, 변동비), 유지관리성, 에너지공급 안전성, 설치 공간, 설치대수(분할 설치 및 예비기 설치 필요), 전 부하 상당시간 등을 고려하여 선정한다.

공기조화를 할 때 냉·온의 양쪽 매체를 공조기에 보내 필요에 따라 연간에 걸쳐 자유롭게 구분하여 사용할 수 있는 열원방식을 복열원이라 한다. 이 방식은 구역에 따라 냉방과 난방이 동시에 필요할 때 유용하다. 여름철에 냉수, 냉풍, 냉매 중 한 가지인 냉열만, 겨울철에는 온수, 온풍, 증기 중 한 가지인 온열만의 열매체를 사용하는 방식을 단열원이라고 한다.

히트펌프(Heat Pump) 냉·난방시스템

가. 히트펌프의 개요

히트펌프는 외기, 저온수 등 낮은 온도의 열원으로부터 열을 흡수하여 따뜻한 실내공기, 온수 등의 높은 온도의 열원을 만들어 열이 필요한 곳에 열을 방출하는 장치이다. 히트펌프는 냉·난방이 가능한 공조장치로 주로 냉방 목적으로 이용되고 있다.

히트펌프의 특징은 구동에 필요한 에너지보다 더 많은 양의 에너지를 열에너지의 형태로 공급한다. 히트펌프는 증발기 측에서 주변의 열을 흡수하여 활용하기 때문에 효율이 높다.

에어컨은 실외에 설치한 열교환기(응축기)를 이용하여 열을 방출하고 실내에 설치된 열교환기(증발기)에서 열을 흡수하여 냉각된 공기를 실내로 내보내는 것이다. 히트펌프도 에어컨과 마찬가지로 사이클 내에 냉매가 들어 있어서 냉매의 압축, 응축, 팽창, 증발

과정을 거치면서 열원으로부터 열을 흡수 또는 방출한다.

히트펌프는 냉·난방이 가능한데, 난방 시에는 열교환기의 역할이 바뀌어 실외 열교환기(증발기)에서 열을 흡수하여 실내 열교환기(응축기)를 이용하여 열을 실내로 방출한다.

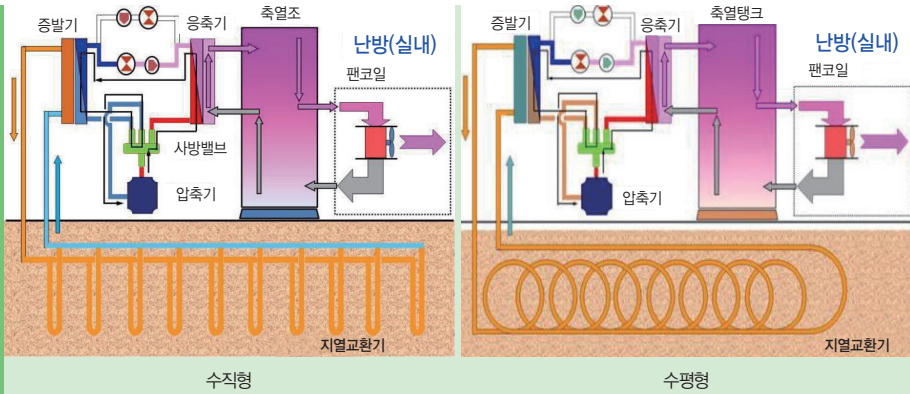
히트펌프는 구동 방식에 따라 전기식과 엔진식, 열원에 따라 공기열원식, 수열원식(폐열원식, 지열원식), 지열원식 등으로 구분한다. 열 공급 방식에 따라 온풍/냉풍, 온수/냉수, 축열조/축냉조, 이용 범위에 따라 냉방, 난방, 제습 및 냉난방 겸용, 냉난방 제습 전용 등으로 구분한다. 또한 지열교환기 설치 방법에 따라 수평형과 수직형으로 구분한다. <그림 2-27>

지열 히트펌프를 설치할 경우 설치비의 상당부분을 차지하는 것이 지중열교환기 설치 공사이다. 수평형 방식은 수직형에 비해 적은 비용으로 열교환기를 설치할 수 있다. 그러나 열교환기를 수평으로 매설하기 위해서는 넓은 면적의 부지를 필요로 한다. 또한 수직형에 비해 열교환 성능이 다소 낮아서 열교환기 길이를 다소 늘려주어야 동일한 열교환 성능을 확보할 수 있다.



<표 2-13> 히트펌프의 비교

구분	수열원 히트펌프	공기열원 히트펌프
에너지원	• 에너지원을 물 형태로 흡수	• 대기 중 열원을 공기 형태로 흡수
이용형식	• 물 대 물 • 물 대 공기	• 공기 대 공기 • 공기 대 물
열원	• 지하수, 하천수, 저수지, 바닷물 • 폐열(목욕탕, 사우나 등)	• 전기 혹은 가스 • 환기열, 대기열
특징	• 순환배관 펌프 설비가 필요 • 판형 또는 Shell & Tube 열교환기 이용 • 저소음에 뛰어난 내구성 • 초기 투자비가 상대적으로 큼	• 실외기, 실내기가 구분됨 • 실외기는 설치공간과 소음우려 등으로 개방된 공간에 설치 • 초기투자비가 상대적으로 적음

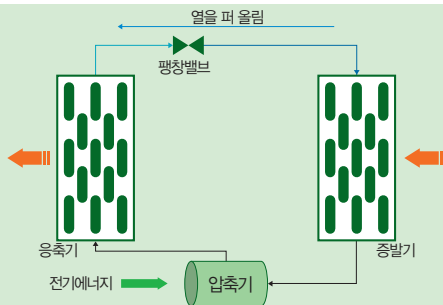


〈그림 2-27〉 지열 히트펌프 시스템

나. 히트펌프의 원리 및 구조

히트펌프는 저온의 열을 고온의 열로 끌어올리는 장치로, 냉매가 압축, 응축, 팽창, 증발 4가지 단계를 거치면서 순환하여 온도가 낮은 증발기에서 열을 빼앗아 온도가 높은 응축기로 열을 이동시키는 역할을 한다.

냉방 시에는 차가운 공기는 실내로, 뜨거워진 공기는 실외로 배출하고 난방 시에는 뜨거운 공기는 실내로, 차가워진 공기는 실외로 배출한다.



〈그림 2-28〉 히트펌프의 원리

히트펌프의 주요 구성요소는 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기이다. 압축기는 증발기로부터 저온, 저압의 냉매증기를 흡입, 압축하여 고온, 고압의 냉매증기로 만든다. 냉매증기는 냉매가 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기 순으로 순환하도록 하는 원동력을 제공하는 요소로, 가장 많은 에너지(대부분 전기에너지)를 사용한다.

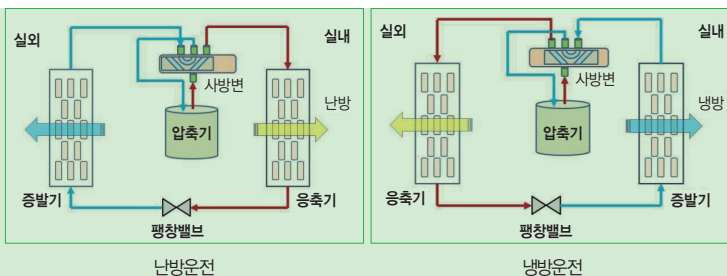
응축기는 압축기에서 압축된 고온, 고압의 냉매증기를 냉각시켜 고열원으로 열을 방출하고 냉매를 액체상태로 응축시키는 역할을 한다. 응축기를 통과하는 냉매는 고온, 고압의 기체에서 고온, 고압의 액체로 상변화가 일어난다. 냉방은 상변화가 일어날 때 열을 고열원측(실외)으로 방출한다. 열은 공기나 물로 방출되며 응축기에서 방출되는 열은 난방열로 이용할 수 있다.

팽창밸브는 응축기를 통과한 고온, 고압의 액체상태 냉매를 팽창시켜 저온, 저압의 액체미립자로 만들어 증발기에서 냉매의 증발이 쉽게 일어나도록 한다. 냉매의 유량조절 역할도 한다.

증발기는 저열원으로부터 흡수한 열을 이용하여 저온, 저압의 미립자 상태의 냉매를 증발시킨다. 증발기를 통과한 매체는 저온, 저압의 냉매 증기로 상변화가 일어난다. 냉매의 증발잠열을 이용하여 저열원으로부터 열을 흡수하므로 저열원(실내)측의 온도가 낮아져서 냉방효과를 얻는다.

히트펌프를 이용한 냉난방 원리는 다음과 같다. 히트펌프의 냉매는 압축기 → 응축기 → 팽창밸브 → 증발기 → 압축기 순으로 순환한다. 저온 저압의 가스가 압축기에서 압축되면서 고온고압 상태로 되어 응축기로 전달되고, 응축기에서 열을 방출하면서 냉매는 액화되어 고압액화 상태가 된다. 고압액화된 냉매는 팽창밸브에서 감압되면서 저온 저압의 액화 상태로 되고 증발기에서 외부로부터 열을 흡수하면서 증발하고 저온 저압의 가스 상태가 되어 압축기로 들어간다.

이 과정에서 응축기에서는 열을 방출하고 증발기에서는 열을 흡수한다. 냉난방은 4방밸브(4-Way valve)에 의해 냉매의 흐름을 바꾸어 이루어진다. 냉매의 흐름 방향을 바꾸면 증발기는 응축기로, 응축기는 증발기로 기능이 전환된다.



〈그림 2-29〉 히트펌프를 이용한 냉난방

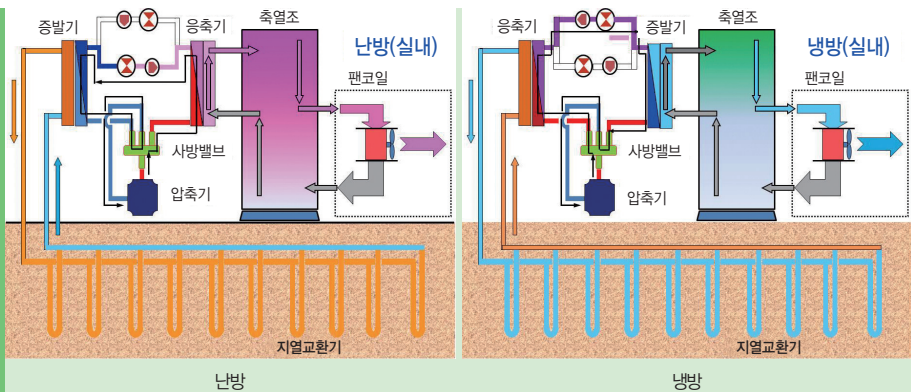
다. 지열 히트펌프 시스템

기존의 히트펌프는 증발과정에서 외부공기로부터 열을 흡수하거나 외부로 배출하여 냉열 또는 온열을 생산하는 방식이다. 난방 중에는 외기온도가 낮고 냉방 중에는 외기온도가 너무 높아 열 흡수와 배출에 많은 에너지가 소비된다.

지열 히트펌프는 태양열의 47%가 지표를 통해 저장되는 지열을 이용한 장치이다. 지열 히트펌프는 지중열을 이용하는 냉난방 시스템으로, 공기열원식 히트펌프 보다 2배 이상 성능(COP¹, EER²)이 우수하다. 히트펌프의 효율은 압축기에서 소비한 에너지에 대한 냉각(흡수)열량의 비율로 표시한다.

지열을 손쉽게 이용하는 방법은 지하에 지중열교환기를 매설하여 땅속 열을 히트펌프의 열원으로 이용하는 것이다. 난방 시에는 시설에 필요한 열을 땅속에서 얻고, 냉방이 필요할 경우는 시설 내부에서 흡수한 열을 땅속으로 방출한다.

축열식 지열히트펌프 시스템은 난방 시 지열교환기에서 흡수한 열을 판형열교환기를 통하여 히트펌프의 증발기로 전달한다. 증발기에 전달된 열은 히트펌프의 압축기에서 60~80℃의 고온열로 변환되며, 고온열은 응축기 역할을 하는 판형열교환기를 통하여 40~50℃의 온수로 축열조에 저장된다. 반대로 냉방 시에는 에너지 흐름이 난방과는 반대로, 축열조는 냉각되고 땅속은 가열된다.



〈그림 2-30〉 지열 히트펌프 시스템

Tip.

v1 COP(Coefficient of Performance)

에너지 소비효율을 나타내는 성능계수로 투입에너지에 대한 산출에너지의 비율이다. 대부분의 경우 1보다 크다.

v2EER(Energy Efficiency Ratio)

에너지 소비효율로 기계에 들어가는 전체 에너지량에 대한 실제로 출력되는 에너지 비율이다(단위 : Kcal/h·w).



〈표 2-14〉 지열 히트펌프 냉난방 시스템의 장단점

구 분	장 점	단 점
경제성	- 장비효율이 좋음 - 혹한기, 혹서기에도 성능 저하가 없고 효율 일정 - 별도 관리인이 필요 없어 유지비용 절감 - 냉방 시 별도의 비용 없이 온수사용 가능(효율이 좋아짐)	고가의 설치비
편리성	- 냉·난방 전환이 쉬움 - 냉방, 난방, 급탕이 1대의 장비로 가능 - 별도의 기계실 없이도 설치 가능 - 실외에 장비가 없어 건물의 미관 좋음 - 유지 보수할 부분이 적어 관리가 쉬움	외기 도입을 위한 별도의 설비 필요 (개별공조 - 내부)
안전성	- 화석연료의 사용이 없어 화재나 폭발 위험이 없음 - 장비 외부에 가스 배관이 없고 인·허가가 필요 없음 - 냉각탑이 필요 없어 세균번식의 우려가 없음 - 장비가 간단하고 고장이 적음	지열파이프가 썰 때 보수가 어려움
친환경성	- 전기소비가 적어 설비비용과 화석연료 사용량을 줄임 - 연소가스(CO₂)의 발생이 적음 - 연료의 불완전 연소로 인한 유해가스 및 분진발생이 없음 - 냉각탑 소음 및 열방출이 없음 - R-410A 등 친환경 냉매의 적용이 가능	지열파이프가 썰 때 부동액이 땅속으로 흘러들어가 환경오염 우려

라. 공기열원 히트펌프

공기열원 히트펌프는 외부 온도가 5℃ 이하가 되면 증발기에 성에(서리)가 발생한다. 성에가 끼면 공기 흐름을 방해해 전열효과가 감소하고 냉매 증발이 원활하지 않게 된다. 냉매 일부가 증발되지 않고 액체 냉매가 압축기로 유입되면 압축기가 손상될 수 있다. 외부 기온이 영하로 떨어질 경우에는 냉매 증발이 어렵기 때문에 압축기 보호를 위해 히트펌프의 운전을 정지하는 보호장치를 설치한다.

수열원 또는 지열원 히트펌프는 지속적인 열공급이 가능하여 공기열원 히트펌프의 문제점을 대체할 수 있는 장치로 보급되고 있다.

히트펌프 선정 및 이용기술

가. 히트펌프 선정 시 고려사항

히트펌프를 난방으로 사용할 때 외기 온도 변화에 따라 실내 난방부하가 변하는데,



이때 히트펌프의 난방용량은 반대로 된다. 즉 외기 온도가 높을 때는 난방부하가 적어지기 때문에 히트펌프의 난방용량이 필요이상으로 되고 외기 온도가 떨어지면 난방부하가 커지므로 히트펌프의 난방용량은 부족하게 된다.

따라서 외기 온도가 낮을 때에 목표온도를 유지하려면 외기 온도가 낮을 때를 기준으로 히트펌프 용량을 설계하거나 부가적인 난방장치가 필요하다. 그런데 히트펌프 실내기 및 실외기 크기는 펌프 설치 시에 결정하고, 펌프는 고정설치이므로 겨울철 난방부하와 여름철 냉방부하를 동시에 제어하기 어렵다. 난방용 보조히터 등 보조 장치가 있다면 냉방부하를 맞추어 설계하는 것이 바람직하다.

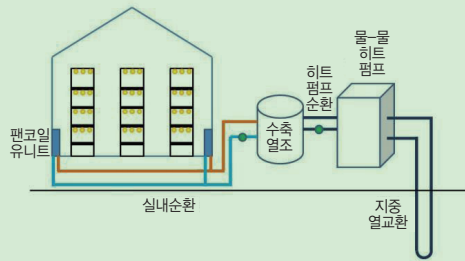
냉·난방 시스템은 시스템에 축열조를 설치하면 용량을 줄일 수 있다. 그렇지만 비상시 안전성을 높이고 설치 용량을 줄이기 위해서는 보조 냉·난방 시스템이 필요하다. 냉·난방 시스템을 중앙에서 통합관리·제어하려면 냉온수를 만들어 축열조에 저장하고 제어 시스템에서는 냉온수를 순환하는 역할만 하도록 구성하는 것이 바람직하다. 또한 각 방의 온도는 통합환경 제어 시스템에서 제어하고 냉·난방 시스템은 축열조, 배관 내 온도를 측정하여 적절한 온도를 유지한다.

겨울철 난방 시 외기 온도가 낮아 외기와 증발기 내 냉매와의 평균 온도 차가 감소하여 열을 흡수하는 증발기의 성능이 감소할 때에는 증발기 온도를 상승시킨다.

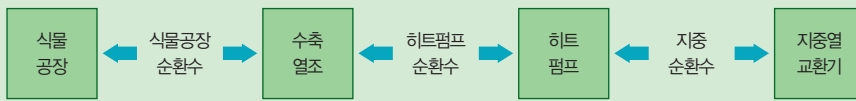
나. 에너지절감 기술

여름철 주·야간을 바꾸어 밤에 조명하여 광합성을 유도하고 낮에 호흡을 시키면 주간보다 야간에 외기 온도가 낮아서 COP를 증가시킬 수 있다. 또한 1년 내내 거의 일정한 온도를 유지하고 있는 지중열(약 15℃)을 이용할 경우, 여름에는 냉열원으로, 겨울에는 온열원으로 이용하면 COP효율이 증가해 에너지를 절약할 수 있다.

최대(피크)전력 소비시기인 여름철에는 냉방에 소비하는 전력이 많다. 그러나 단기간에 발생하는 최대전력소모에 대비해 설비투자를 하면 가동률이 낮아지므로 경제성이 낮아진다. 따라서 열에너지 저장 시스템(축열조)을 도입하여 전력요금의 낮은 시간대, 부하가 적은 시간대에 에너지를 생산하여 저장했다가 부하가 큰 피크 시간대에 사용하면, 냉온수를 생산하는 데 필요한 냉동기 또는 히트펌프 유닛 용량을 줄일 수 있다.



〈그림 2-31〉 수축열 지열 히트펌프의 구성



〈그림 2-32〉 수축열 지열 히트펌프의 에너지 흐름

축열조는 축열조 하나만 설치하는 방법과 두 개를 병렬로 배치하는 방법이 있다. 한 개의 축열조를 설치할 때는 부하가 큰 쪽을 중심으로 구성하는 것이 좋다. 냉방이 필요할 때 냉수 순환은 부하가 큰 쪽(보통 냉방 시)에서 열교환이 이루어질 때 축열조를 통과하도록 하고, 부하가 작은 쪽(보통 난방 시)은 우회하도록 배관 구성을 하는 것이 바람직하다.

히트펌프는 펌프와 송풍기 선정이 중요하다. 보통 최대 부하를 기준으로 하여 용량을 선정하고 안전율을 적용한다. 따라서 실제 운전 시에는 용량이 남고 에너지 소비량도 증가하므로 부하에 맞게 조절해야 할 필요가 있다.

모터의 전력소모량을 최소화하려면 인버터를 설치하여 변동되는 유량이나 압력의 변화를 검출하여 펌프의 회전수를 제어한다. 이처럼 부하에 따라 펌프의 회전수를 변화시켜 소비전력을 줄일 수 있다.

냉방 시 팬 코일에는 많은 양의 물이 응축되므로 팬 코일에 생긴 응축수는 빠져나가게 한다. 응축수는 정수(필터링) 과정을 거친 다음 저장 탱크에 저장했다가 용수로 사용할 수 있다.

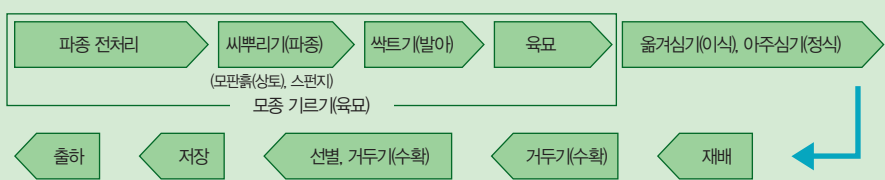
5 자동화

최근 농작업장에서 일손부족이 심각하고 인건비 상승에 따른 경영부담이 증가하고 있다. 따라서 그동안 인력에 의존했던 농작업을 기계화, 자동화하는 장치가 빠르게 도입되고 있다.

생산공정 자동화는 식물공장 내부에서 이루어지는 여러 작업공정을 자동화해 작업에 투입되는 인원 감소, 인건비 절감과 작업환경 개선효과를 가져온다. 하지만 초기투자비, 운영비 등 비용이 들어가기 때문에 자동화를 어느 수준으로 할 것인지 결정해야 한다.

소규모 식물공장은 경제성을 고려하여 일부 작업의 자동화, 반복 작업, 심야 작업 및 고령자를 대체할 수 있는 작업의 자동화가 우선 도입되어야 한다.

식물공장의 생산공정은 씨뿌리기(파종)부터 출하까지의 과정, 즉 파종 전처리, 씨뿌리기(파종), 모종 기르기(육묘), 옮겨심기(이식), 아주심기(정식), 재배, 거두기(수확), 선별, 포장작업 등으로 구성된다. 자동화에는 이러한 생산공정 자동화와 시설, 환경, 배양액 관리 자동화로 구분할 수 있다.



〈그림 2-33〉 식물공장 생산공정 흐름도

좋은 모종(묘)을 키우는 것은 고품질, 다수확 생산의 기초가 되는 중요한 작업이다. 모종의 질은 식물의 수량과 품질에 결정적인 영향을 미친다. 고품질 농산물을 연중

계획 생산하기 위해서는 좋은 모종이 연속적으로 공급되어야 한다.

파종 전처리

씨앗(종자) 처리는 모양과 크기에 따른 씨앗 고르기(종자 선별), 불량 씨앗과 이물질 제거, 씨앗 소독, 싹트기(발아) 촉진을 위한 프라이밍^{*)}, 씨앗 담그기(침종), 싹 틔우기(최아)처리 등을 말한다. 이 과정은 씨뿌리기(파종) 전에 병충해를 예방하고 수확량을 늘리기 위해 필요하다.

가. 씨앗 고르기(종자 선별)

종자는 크기(길이, 폭, 두께), 비중, 모양, 무게, 외부조직, 색깔, 액체 친화성, 전기적 성질 등에 따라 선별한다. 채종 종자에 있어서 종자 선별은 반드시 필요한 과정이지만, 종자를 구매하여 사용하는 경우에는 시판 전에 정선, 소독이 되어있기 때문에 바로 사용할 수 있다.

1) 씨앗 코팅(펠레팅)

크기가 작고 불규칙한 씨앗(종자)은 사람의 힘이나 기계를 이용한 씨뿌리기(파종)가 어렵다. 따라서 기계로 씨뿌리기(파종)가 쉽도록 씨앗을 덮는 소재(피복재)로 감싸 정형화하여 구형으로 만드는데, 이를 코팅 씨앗(종자) 또는 펠릿 씨앗(Pelleted seed)이라고 한다. 펠릿 씨앗은 표면을 매끄럽게 코팅하여 일정한 크기의 구형 또는 럭비공 모양으로 만들어 기계적 강도나 탄성을 유지하게 한다. 펠릿 씨앗을 이용하면 사람의 힘을 이용한 씨뿌리기(파종)나 씨뿌리기(파종) 작업의 기계화가 쉽다.

2) 모판흙(상토) 소독

해충과 병원균이 일단 재배시스템 또는 실내로 들어오면 증식과 전파가 쉬워 급격히 퍼져 큰 피해를 입을 수 있다. 따라서 건전한 모판흙(상토)에서 모종을 기르는 것(육묘)이 매우 중요하다.

안정생산을 위해서는 보수성(물을 저장하는 성질), 통기성, 배수성(물빠짐)이 좋고 유



해성분이 없는 모판흙(상토)을 선택하는 것이 기본이다. 여기에 해충과 병원균의 유입 확산을 예방하기 위한 모판흙(상토) 소독이 필요하다.

모판흙(상토)을 소독하는 방법으로는 열처리 방법과 약제처리, 훈증 등의 화학적 방법이 있다. 인공광 식물공장은 열처리 방법이 적당하다. 열처리 방법은 고압증기멸균기(Auto Clave)를 이용하여 고압(1kgf/cm² 이상)과 고온(110~135℃ 이상)에서 증기로 30분 정도 하면 된다.

씨뿌리기(파종)

파종기는 씨앗의 크기, 모양, 처리량, 작업여건, 경제성 및 공장 규모 등을 고려해 선택한다. 파종기는 자동화 정도에 따라 수동 파종기, 반자동 파종기, 자동 파종기로 나뉘며, 용도에 따라 트레이용과 스펜지 배지용으로 구분된다.

수동 파종기는 동력을 이용하지 않고 배종 홈을 통과한 씨앗을 자유 낙하시켜 뿌리는 방식으로, 배추, 양배추, 고추 등 비교적 둥근 씨앗에 적합하다.

반자동 파종기는 둥근 씨앗, 납작한 씨앗, 길쭉한 씨앗 등 씨앗의 형태와 관계없이 진공으로 노즐에 종자를 붙여 배출하는 방식으로 정확한 씨뿌리기(파종)가 가능하다.

자동 파종기는 진공식으로 일반 씨앗과 코팅 씨앗에 사용할 수 있다. 트레이 공급기나 인력에 의해 투입된 모종을 기르는 트레이는 파종기 위 컨베이어 벨트에 의해 이송되면서 뿌려진다. 컨베이어 벨트 속도를 조절하여 파종 속도를 조정할 수 있다. 또한 씨뿌리기 노즐대, 유도장치를 교체하면 128구, 162구, 200구 등 다양한 규격의 트레이를 사용하여 씨를 뿌릴 수 있다.

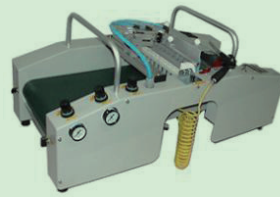
Tip.

v1 프라임

발아 전 씨앗을 폴리에틸렌글리콜, 질산칼륨 등 고삼투압 용액에 처리해 발아세일정기간 동안 싹이 튼 씨앗의 수를 백분율로 표시한 것을 높이고, 싹트는 시간을 줄이며 싹트는 힘(발아력)을 증진시키기 위한 작업을 뜻한다.



수동 파종기



자동 파종기

〈그림 2-34〉 파종기 종류

진공식 파종기를 사용할 때 종자 흡착률은 진공압력에 의해 좌우되므로 적정 압력의 설정이 중요하다. 실패율(결파)을 줄이기 위해서는 진공 압력계의 눈금을 $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상으로 조정하는 것이 좋다.

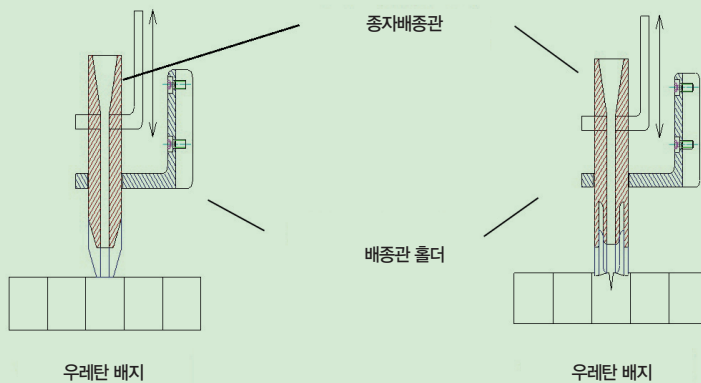
 〈표 2-15〉 압력별 종자 부착율

진공발생기 공급압력(kg/cm^2)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
부착율(%)	50.0	87.7	99.2	100	100	100

(농촌진흥청, 《신선업체소 주년안전생산을 위한 식물생산공장시스템 개발》, 2005년)

스펀지 배지용 파종기는 우레탄 스펀지에 만들어진 λ 자형 파종 홈을 벌린 후 종자를 떨어뜨려 뿌린다. 우레탄 스펀지의 규격은 $28 \times 28\text{mm}$ 이고, λ 자형 홈은 10mm 이다. 파종기는 파종노즐, 종자 배종관, 배종관 받침 등으로 구성된다. 파종기의 작동 원리는 다음과 같다.

- ① 진공 흡인 노즐에 부착된 씨앗을 종자 배종관(씨앗을 배출하는 관)으로 떨어뜨린다.
- ② 종자 배종관은 공기압력에 의해 상하 작동되며 노즐에서 떨어지는 씨앗을 트레이로 떨어지도록 유도한다.
- ③ 종자 배종관이 내려와 배종관의 끝 돌기가 우레탄 스펀지를 누르면 스펀지 홈이 벌어지고, 이때 씨앗이 홈에 떨어져 심겨진다. 농촌진흥청 국립농업과학원에서 개발한 스펀지 배지용 파종기의 성능은 1알(립) 뿌리기 88.3%, 2알(립) 뿌리기 4.0%, 3알(립) 뿌리기가 1.8%, 전체 파종율이 94.1%로 나타났고, 빈 포기(결주)도 5.9%로



파종 원리



파종기

〈그림 2-35〉 스펀지 배지용 파종기

비교적 높게 나타났다. 작업능률은 273(13 × 21) 스펀지용에 뿌릴 때 시간당 125매를 파종할 수 있어 인력의 2매에 비하여 61배 능률적인 것으로 나타났다. 그러나 실제 스펀지 배지에 씨를 뿌리는 것은 어려움이 있어 새로운 씨뿌리기 기구 개발이나 정밀도를 높이는 개량이 필요한 것으로 나타났다.

싹트기(발아) 및 모종 기르기(육묘)

발아는 씨눈에서 싹이 트는 과정으로, 싹트기(발아)에는 많은 양의 산소와 수분이 필요하다. 이 시기에는 물주기(관수)를 하되 너무 많은 수분으로 인해 산소가 부족하지 않도록 주의한다. 씨앗(종자)에 프라이밍 처리를 하면 싹이 트는(발아) 속도 및 균일도를 높일 수 있다.

씨를 뿌린 후 흙을 덮어줄 때(복토)는 원활한 산소 공급을 위하여 버미큘라이트(질석)나 펄라이트와 같이 수분지탱력¹⁾(보수력)이 작은 모판흙(상토)을 이용한다. 상추는 광발아²⁾ 특성을 지니고 있기 때문에 가급적 얇게 질석을 덮는다. 씨뿌리는 깊이가 깊거나 흙을 많이 덮으면 싹트기(발아)가 늦어지며 불량해진다.

발아실은 싹트기(발아)에 적합한 온도와 상대습도를 포화상태에 가깝게 유지하여 씨앗의 수분 손실을 최대한 억제하여 균일한 싹트기를 유도한다. 농촌진흥청 국립농업과학원에서 발아실 내 설정온도를 18~30℃인 상태로 정치마상추의 씨를 뿌려 싹이 틀 때까지 발아기에 넣어두고 조사한 결과, 18℃에서는 싹트는 시간이 오래 걸리고 싹

 <표 2-16> 온도별 싹트는 비율(발아율) 및 싹트는 시간

구 분	발아기 설정온도(℃)						
	18	20	22	24	26	28	30
싹트는 비율(%)	99.5	100	100	100	100	100	99.5
싹트는 시간(시간)	58.5	49.5	47.5	47.5	45.1	45.1	45.5

♣ 유의사항

- 싹트는 씨앗의 수분흡수시간은 수 시간 이내이므로 필요 이상의 물주기(관수)는 자제한다.
- 모판흙(상토)이 지나치게 수분이 많거나 건조하지 않도록 한다.
- 모판흙(상토)의 EC(Electrical Conductivity, 전기전도도)나 공중습도가 높지 않게 관리한다.
- 씨앗의 저장과 보관은 2~4℃에서 원래 포장되어 있는 상태 그대로 하는 것이 안전하다.
- 씨앗을 오래 보관하는 것은 좋지 않으므로 필요한 양을 바로바로 사서 쓴다.



이 잘 안 트며, 28℃ 이상이 되면 싹트는 시간은 짧아졌으나 싹이 튼 정도가 고르지 못하고 20~28℃에서 싹트기가 양호했다.

모종 기르기(육묘)는 특별히 제조된 모판흙(상토)을 모판, 육묘상자 또는 포트(분, Pot)에 채워 기르는 상토육묘와 모판흙(상토) 대신에 배양액을 이용하는 양액육묘(또는 수경육묘)가 있다.

상토육묘는 시판하는 원예 모판흙을 사용하거나 피트모스, 코코피트, 펄라이트 등을 혼합한 모판흙을 트레이에 채운 다음 씨를 뿌리고 굵은 버미큘라이트나 피트모스 등으로 덮어 모종을 기른다. 비료가 없는 모판흙(상토)은 씨를 뿌린 직후부터 거름주기(시비)가 필요하고 비료가 어느 정도 들어있는 모판흙(상토)은 비료가 부족해지기 시작하면 비료를 주어야 한다. 또 같은 모판흙(상토)이라 하더라도 포트 크기가 작으면 비료가 부족하지 않도록 양분과 수분 조절에 신경을 써야 한다.

양액육묘 배지로는 피트모스, 펄라이트, 암면, 훈탄(왕겨숯) 등을 사용한다. 이밖에도 모종 기르기용 우레탄 스펀지나 암면 모종 기르기(플러그) 피트 블록을 이용하기도 한다. 양액육묘는 상토육묘에 비해 생육이 빠르고, 병해충 발생이 적으며, 모판흙 제조에 소요되는 노력과 자재가 절감된다.

우레탄 스펀지 배지를 사용하여 모종을 기르는 경우에는 먼저 순수한 물이나 양액(EC 1.0mS/cm, pH 6.0)으로 스펀지를 모종을 기르는 트레이에 넣어 씨앗을 뿌리면 물 관리가 쉽다. 스펀지에 적당한 수분을 함유하게 하는 것은 씨앗이 수분을 유지하도록 하고 씨앗 껍질을 벗는 것을 돕는다. 암면과 펄라이트의 경우에는 한번 건조하면 다시 수분을 흡수하기 어려워지기 때문에 씨를 뿌린 후 수분관리에 주의해야 한다.

Tip.

v1 수분지탱력(보수력)

흙은 흡착력 또는 모세관장력 등의 뱀아들이는 힘(흡인력)으로 수분을 보관할 수 있는데, 이 흡인력에 따른 토양수분함량을 중량 백분율 또는 용량백분율 등으로 표시한 것

v2 광발아

빛에 의해 싹트기가 유도되는 성질

옮겨심기(이식) 및 아주심기(정식)

옮겨심기(이식)는 작물을 다른 공간이나 트레이로 이동하는 것을 말하고, 아주심기(정식)는 키운 모종을 재배 배지에 옮겨 심는 작업으로 옮겨심기(이식)와 구분하여 정의한다.

식물공장에서 재배하는 작물은 노지에서 재배하는 작물과는 달리 제한된 구역에서 같은 품종의 작물을 연속 생산하는 특징을 가지고 있어 일정한 크기의 모종을 다룬다는 측면에서 옮겨심기(이식) 기계화가 비교적 쉽다. 그러나 옮겨심기(이식)를 위해서는 모종의 모양 및 크기가 일정하여야 하고 모종을 기르는 트레이에 빈 곳이 없어야 한다는 전제조건을 가지고 있어 모종을 기르는 기술이 먼저 이뤄져야 한다.

옮겨심기(이식) 자동화를 위해 빈 포기(결주묘) 또는 건실하게 성장하지 못한 모종이 발생하는 경우 이를 제거하고 건실한 모종을 보충하는 보식 과정이 필요하다. 접목을 해야 하는 작물은 접목로봇으로 자동으로 접목작업을 수행하는 일련의 기계 작업이 필요하다. 아주심기 또는 옮겨심기 및 이송 과정에서 작물의 병원균 감염이나 물리적인 손상 등이 일어날 수 있기 때문에 세심한 주위가 요구된다.

작물을 고려한 시스템 개발을 위해서는 씨앗의 특성 및 작물의 성장에 따른 물리적인 특성을 구명하여 시스템을 최적화할 필요가 있다. 단순히 모종의 유무만을 판별하는 것으로 좋은 모종과 불량 모종을 구별할 수는 없다. 카메라와 같은 기계 영상을 이용하면 모종의 모양, 크기, 위치, 성숙도나 활성에 관계된 많은 정보를 기반으로 좋은 모종을 골라낼 수 있다.

재배시스템

일반적인 작물 재배에는 아주심기(정식) 후부터 거두기(수확) 전까지 물주기(관수), 비료주기 관리(비배관리) 등이 필요하나, 식물공장에서는 어린 모종을 재배 베드로 아주심기(정식)한 후부터 물주기(관수), 비료주기 등이 자동으로 관리된다.

재배시스템은 식물공장의 유형을 구분짓는 요소이기도 하며, 실질적인 재배가 이루어지는 공간이므로 시스템 계획과 설비가 무엇보다 중요하다.



식물공장의 재배시스템은 작물이 고정되어 있는지 또는 이동하는지에 따라 고정식과 이동식으로 나뉜다. 식물공장은 고정식 재배방식을 도입하는 경우가 일반적이지만 자동화, 환경조건의 균일화, 토지 생산성 향상을 위해서는 밀식재배(빈틈없이 뽕뽕하게 심기)와 이동 재배방식의 도입이 필요하다.

이동식은 제어방식이 복잡하고 설치비가 많이 들지만, 일정한 장소에서 농작업을 할 수 있어 노동력 절약이 가능하며 작물의 생육 정도에 따라 작물의 포기과 포기 사이의 거리(주간)를 조절할 수 있어 공간이용효율을 높일 수 있다.

고정식 재배방식은 작업장소가 여러 곳에 분산되지만, 이동식 재배방식에서는 작업장소가 한 곳에 집중되어 모든 작업을 수행한다. 이동식 재배방식에서는 온실 내 온도차가 생겨도 작물의 위치를 이동시킬 수 있어 생육에 미치는 영향을 완화할 수 있다. 재배용기와 모종을 기르는 트레이 또는 식물체를 실내에서 위치를 이동하거나 외부로 이동 및 정렬하는 과정에서 노동절약(생력화) 작업을 위한 자동화 시스템이 필요하다. 식물공장에서 식물체의 위치이동은 식물생장과 생산성 향상에 도움을 줄 뿐만 아니라, 공간을 효율적으로 이용하는데 중요한 기술이다.

수경재배는 영양소가 들어있는 수경액 속에 뿌리를 담가서 식물을 생장시키는 것으로, 흙 대신 작물의 생육에 필요한 무기양분을 적정 농도로 용해한 양액으로 작물을 재배하는 것이다. 수경(양액)재배 시스템은 재배 베드 및 장치, 양액제어 시스템, 양액 재처리장치 등으로 구성된다. 작물 특성과 재배방식에 따라 적합한 방식과 장치를 설치해야 한다.

가. 재배 베드

국내에 보급된 수경재배 방식에는 박막수경(NFT, Nutrient Film Technique), 담액수경(Deep Flow Technique), 분무경(Aeroponics), 분무수경(Aero-NFT) 등이 있다. 식물공장에서는 잎채소류(엽채류) 재배용으로 박막수경 방식이 가장 많고, 분무경 방식도 일부 채용하고 있다.

1) 재배 베드

재배 베드는 작물을 심는 재식판과 베드로 구성되며, 깊이가 낮고 넓은 베드와 좁고 깊이가 있는 베드가 있다. 깊이가 낮은 베드는 박막수경(NFT) 재배에 적합하고, 좁고 깊이가 있는 베드는 분무경과 고형배지경에 적합하다.

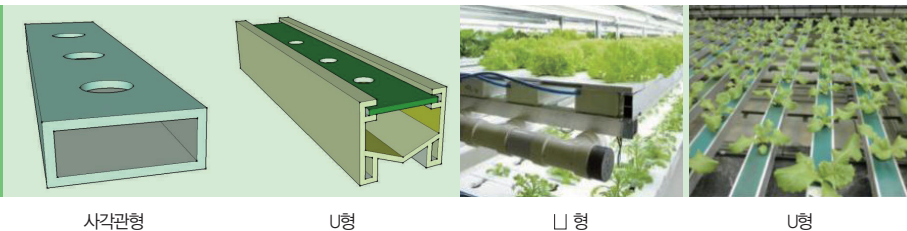
식물공장에서는 시판 스티로폼 베드를 이용하거나 ABS(Acrylonitrile Butadien Styrene Copolymer) 수지, 알루미늄 소재의 배지를 이용한다. 스티로폼 베드를 이용하는 경우는 폭 1.2m, 0.8m, 길이 1m로 만들어진 스티로폼 베드를 연결하여 재배상을 만든다.



〈그림 2-36〉 넥스트팜 재배 베드

2) 재배홈통

재배홈통(Channel, Trough)은 작물을 심은 포트를 올려 배양액을 공급하고, 간격조절장치에 의해 이송되는 자재로, 박막수경(NFT) 재배 베드의 일종이다. 재배홈통의 종류에는 사각관형 재배홈통, 덮개와 U형 홈통이 조합된 재배홈통, 원통형 등이 있다. 재배홈통은 알루미늄, ABS 수지 등의 소재로 만든다.



〈그림 2-37〉 재배홈통의 종류



나. 재배상

재배상의 종류는 이동 여부에 따라 고정식과 이동식으로 나뉜다.

1) 고정식

고정식의 종류에는 재배 베드가 한 층(단)으로 이루어진 평면식과 여러 층(단)으로 이루어진 다단식이 있다. 다단식은 인공광 식물공장에서 채택하고 있는 보편적인 재배 방식으로, 4~8단의 베드를 층으로 설치하여 재배하는 방식이다. 다단 재배장치는 베드를 다단으로 쌓고 형광등, LED와 같은 인공광과 배양액 공급을 위한 급·배수시설을 설치한다.

다단식은 좁은 공간에서 수확량을 늘릴 수 있고 재배관리가 쉽지만, 단마다 설치해야 하는 시설물이 많고 복잡하여 설비비용이 증가한다. 또한 재배 베드의 높이가 높으면 윗단의 작업이 불편하다.



베지텍스



인생테크

〈그림 2-38〉 다단식

다단식 재배 베드를 설치할 때 유의사항은 다음과 같다.

첫째, 재배상 골조의 결합은 나사체결 방식을 써서 나중에 분해, 재조립하거나 변경이 쉽도록 하는 것이 좋다. 둘째, 층간 높이는 30~85cm 정도로 변경할 수 있는 구조가 바람직하다. 셋째, 인공광원은 빛 세기(광강도)를 더 늘이거나 줄일 수도 있어야 하므로 광원 높이(광원과 작물 사이의 거리)가 조절되도록 하는 것이 좋다. 넷째, 재배상 폭은 작업성을 고려하여 1.2m 이내가 되도록 설치하는 것이 좋다.

2) 이동식

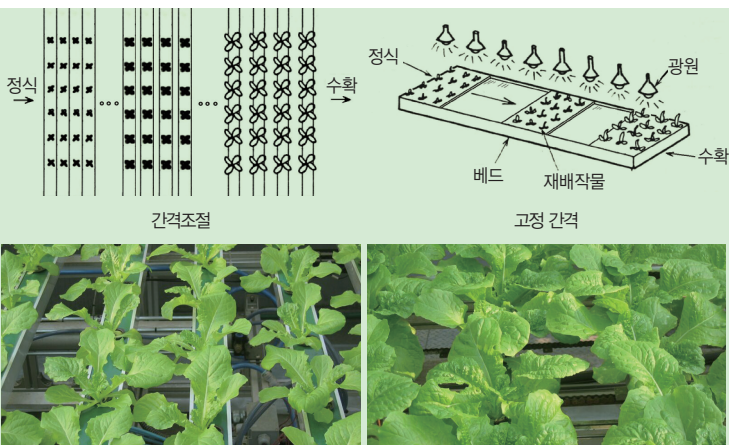
이동식의 종류에는 수평이동식과 입체이동식이 있으며, 수평이동식은 베드가 수평방향으로 이동하는 방식이고 입체이동식은 베드가 수직으로 설치되는 수직이송과 다단 이동 방식 등이 있다.

이동재배는 작물을 이동해 씨뿌리기(파종), 옮겨심기(이식)와 거두기(수확) 작업위치가 일정해지며, 작업을 위해 장치를 이동하는 동력이나 작업자의 이동을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 정해진 장소에서 집중적으로 작업할 수 있어 노동력 절감과 작업효율을 향상시킬 수 있다.

○ 수평이동

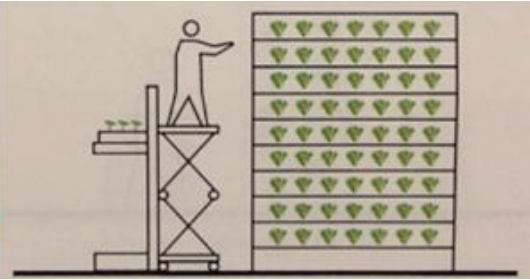
수평이동식은 작물이 수평면상에서 일정방향으로 이동하는 방식과 이동하면서 작물 간격이 조절되는 방식이 있다.

간격조절장치는 아주심기(정식) 단계에서 거두기(수확) 단계로 재배홈통을 이동시키면서 생육단계별로 작물 사이의 간격을 조절하는 장치다. 이 장치는 포기과 포기 사이의 거리를 조절할 수 있어 배게심기(밀식) 재배가 가능하며 단위면적당 생산량을 높이고 아주심기(정식)와 거두기(수확) 시기를 임의로 조절할 수 있고 계획생산이 가능하다. 간격이 조절되지 않는 방식은 아주심기(정식) 단계에서 거두기(수확) 단계로 아주심기판(정식판)을 이동시키며 재배한다.



(그림 2-39) 수평이동 재배(농촌진흥청)

일본의 미라이에서 개발한 재배 시스템은 10단으로, 정식판을 한쪽에서 투입하고 맞은편에서 거둔다. 이곳에서는 형광등을 인공광원으로 사용하고 있으며, 하루 17시간 빛을 쬐인다. 단 사이 간격은 20cm이고 재배면적 4,000m²에서 매일 2,000포기의 상추를 생산한다.

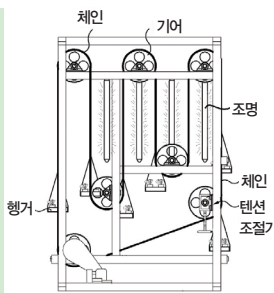


〈그림 2-40〉 다단 재배 시스템(일본 미라이)

○ 수직이송

수직이송 재배는 재배 베드를 상하로 이동하면서 작물을 재배하는 방식으로, 수직 공간을 활용할 수 있어 좁은 공간 내에서 수확량을 늘릴 수 있다.

농촌진흥청 국립농업과학원에서 개발한 작물 수직 재배장치는 프레임, 체인, 기어, 재배 베드, 양액공급장치 등으로 구성된다. 재배 베드는 프레임 위쪽과 아래쪽에 설치된 기어에 연동되어 수직과 수평 방향으로 순환하는 한 쌍의 체인을 연결하는 연결 바에 거치 되어 이송된다. 베드와 베드 사이에는 빛을 보충하는(보광용) 인공광원을 설치하고, 양액은 베드마다 설치한 바코드를 인식하여 작물에 필요한 만큼 공급한다. 제어컴퓨터에는 씨를 뿌린 날짜(파종일), 아주심은 날짜(정식일), 급액횟수, 급액량 등이 기록된다.



〈그림 2-41〉 작물 수직 재배장치(농촌진흥청)

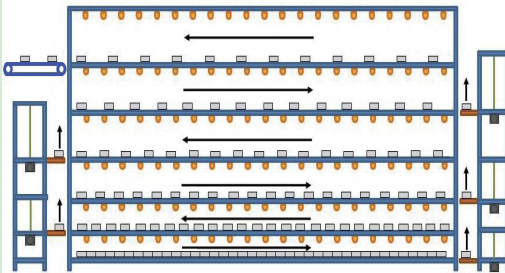
수직재배장치는 재배 베드가 수직으로 이동하면서 순환하기 때문에 베드 사이로 투과되는 자연광을 이용할 수 있고 재배 베드 간 균일한 빛 쏘임(광조사)이 가능한 장점이 있다.

○ 다단이동

다단이동 재배는 한쪽 방향으로 이동하는 방식과 단을 옮겨가며 이동하는 방식이 있다. 수평이동과 마찬가지로 이동 중에 재배홈통 간격이 일정하게 유지되는 방식과 간격이 조절되는 방식이 있다.

농촌진흥청 국립농업과학원에서 개발한 다단이동 재배장치는 프레임, 재배홈통, 간격 조절장치, 승강장치, 양액공급장치, 제어장치 등으로 구성된다. 재배홈통은 각 단에서 수평 이송되어 프레임 끝에서 배출되고 승강장치에 의해 바로 윗단으로 올라간다. 재배홈통은 단마다 반대방향으로 이동한다. 재배 시스템에는 형광등, LED와 같은 인공광원을 설치하고 배양액을 공급, 순환한다.

다단이동 재배장치는 재배홈통을 자동으로 다단이동하여 아주심기(정식) 후부터 거두기(수확)까지의 작업과정을 자동화하고 생육단계에 따라 생장에 필요한 공간을 확보해 공간이용효율 향상과 노동력 절감을 도모할 수 있다.



(그림 2-42) 다단이동 재배장치(농촌진흥청)

다. 양액 공급 제어 시스템

양액 제어는 전기전도도(EC)와 산성도(pH)를 측정하여 농도 및 산도를 작물별 생육 단계에 따라 적정조건으로 유지하는 것이다.

양액 공급 제어 시스템에는 혼합 후 공급방식과 연속혼합 공급방식이 있다. 혼합 후 공급방식은 혼합(저장)탱크에서 목표 EC와 pH가 될 때까지 원수에 농축양액과 산용

액을 혼합 조절하여 각 재배 베드로 보내는 방식이다. 즉, 원수와 농축양액을 혼합탱크에서 조제한 후에 공급한다.

연속혼합 공급방식은 재배 베드에서 회수된 양액과 원수를 시스템에 부착된 소형의 탱크에서 일정 비율로 받거나 선택적으로 받으면서 농축양액과 산용액을 신속히 혼합 EC와 pH를 맞추어 재배 베드로 공급하는 방식이다.

양액 공급 제어 시스템은 센서, 농축양액 공급장치, 펌프, 혼합탱크, 밸브 등으로 구성된다. 양액 공급 제어 시스템이 갖추어야 할 기능은 순차적인 물주기(관수) 순서 설정기능, 물주기(관수)기능, 양액공급기능, 설정 값에 대한 실시간 정보와 전체적인 시스템 상황 표시기능, 경보기능이다. 이밖에 정전 시 설정 값 백업 기능을 통해 각 설정 값들이 보관되며, 전원 복귀 시 자동으로 물주기(관수) 프로그램이 작동해야 한다. 자동, 수동기능이 있어야 하며, 양액혼합 비율을 임의로 조절할 수 있어야 한다.



〈그림 2-43〉 양액 제어 시스템(연속혼합식)의 예

 〈표 2-17〉 양액 계측 센서

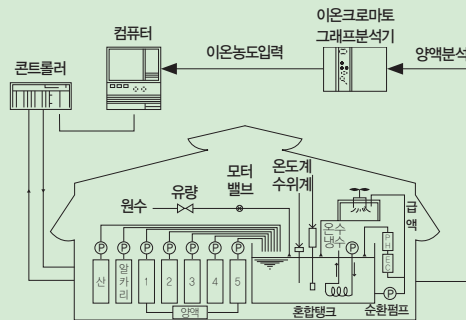
계측제어항목	온도(배양액)	전기전도도(EC)	산도(pH)
측정범위	0~50℃	0~10dS/m	0~50℃
정확도	0.5	0.1	0.1
측정환경	0~6kg/cm ²	0~6kg/cm ²	0~6kg/cm ²

탱크는 광선에 의한 양액 변화가 일어나지 않도록 흑색의 FRP 탱크 등이 권장된다. 정확한 양액혼합을 위하여 유량조절밸브와 전자밸브를 설치해야 한다.

순환식 양액 공급 제어 시스템의 양액농도조절은 순환에 의한 지연시간과 작물의 생장에 따른 영양흡수 변화를 고려할 필요가 있다. pH조절도 마찬가지로 순환에 따른

지연시간과 산 또는 알칼리에 대한 양액 pH의 비선형특성을 고려할 필요가 있다. 일반적으로 양액의 농도는 EC로 나타내고, 작물에 흡수되어 감소한 분량을 보충하기 때문에 고농도의 양액을 추가하는 방식의 농도제어가 일반적이다. 양액의 EC는 화학적 특성이 다른 각 이온의 EC의 합이기 때문에 순환식 재배방식은 작물의 선택적 흡수로 양액 내 이온 간의 균형이 시간이 지나면서 함께 깨져 버린다. 따라서 최적인 지하부 환경을 조성하기 위해서는 양액 성분 계측이 필요하며, 이를 위한 센서 개발도 중요하다.

양액성분 제어방법은 전체 무기이온을 이온크로마토그래프로 분석하여 제어하는 방법, 이온 센서를 이용하여 각각의 이온농도를 측정하면서 양액을 제어하는 방법 등이 있다. 현재 이온 센서 개발 및 계측방법 등에 관한 연구가 진행되고 있으나 측정대상 성분의 한정, 유지관리 어려움, 비싼 가격, 다른 이온의 영향 등의 문제로 아직 실용화에 이르지 못하고 있다.

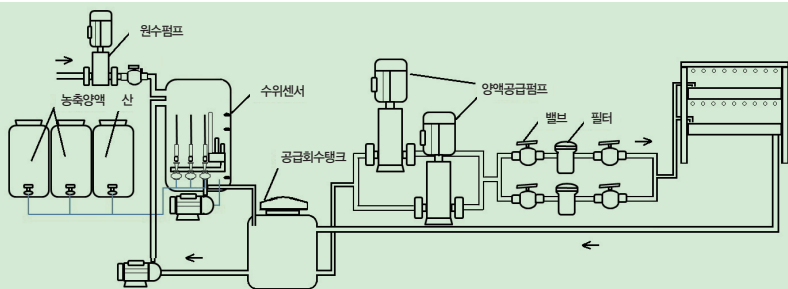


〈그림 2-44〉 이온크로마토그래피의 배치식 처리에 의한 이온 제어

양액 제어 시스템의 설치 및 관리 시 주의할 점은 다음과 같다.

첫째 제어기, 펌프, 밸브 등의 예기치 못한 급작스러운 고장으로 양액공급이 중단될 수 있다. 양액공급이 중단되면 재배 작물의 생육에 지장을 초래할 수 있으므로 고장에 대한 대비가 필요하다. 둘째 고장이 나더라도 빠른 시간 내 조치가 가능하도록 펌프를 병렬로 설치한다거나 관련 부품을 확보하는 것이 필요하다. 펌프를 병렬로 연결하면 펌프의 용량을 적게 하고, 자재비를 절감할 수 있으며 위험에 대비할 수 있다. 셋째 주기적으로 센서와 필터는 점검하고 세척해 주어야 하며, A, B액이 잘 공급되는지

점검과 교정이 필요하다.



〈그림 2-45〉 양액 제어 시스템 구성의 예

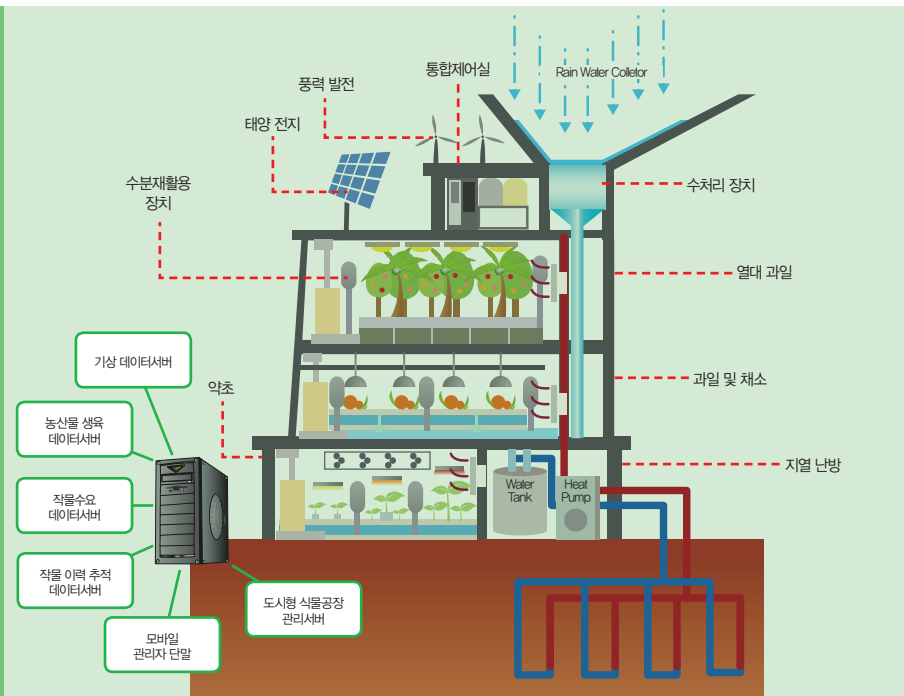
배관은 PE파이프, PVC파이프 등을 사용하여 분해할 수 있도록 하며 노출되도록 배관하는 것이 좋다. 원활한 물빠짐(배수)과 배관 막힘을 예방하기 위해서는 일정 규격 이상의 관을 사용한다. 또한 구역별로 나누어 배관하고 구역별로 양액공급을 위한 전자밸브를 설치한다. 구역별로 양액을 차례로 공급하면 혼합(저장)탱크의 용량을 줄일 수 있다.

거두기(수확) 및 수확 후 처리과정

거두기(수확)공정은 생산공정 중 노동력이 많이 소요되는 공정으로 자동화가 요구되고 있으나, 대부분의 식물공장에서는 주로 인력으로 수확하고 있다. 식물공장에서 재배되는 잎채소류(엽채류)의 거두기(수확)작업을 자동화하기 위한 수확로봇, 수확기, 수확시스템이 국내·외 연구기관에서 연구 개발된 바 있으나 상용화는 미흡한 실정이다. 거둔 후 선별작업 또한 사람의 힘으로 작업하는 곳이 대부분이며, 포장선작업은 거둔 후 곧바로 포장하는 것이 일반적이다. 포장작업의 자동화와 관련해서는 컨베이어에 의해 수확물이 운반되어 포장기에 투입되며, PE계통의 필름에 넣어 2방향 또는 3방향 접착 포장하는 자동포장시스템이 산지유통센터 등에 활용하는 사례가 많으나 식물공장에는 소형 자동포장기, 반자동포장기 정도가 이용되고 있다.

6 환경제어

식물공장을 효율적으로 운영하기 위해서는 냉난방, 가습, 제습 등의 공조 및 수처리 기술, 신재생에너지 이용 제어 기술, 이상 진단 및 정보 기술, 로컬 및 원격 제어 기술 등 다양한 소프트웨어 및 통합 제어 기술이 요구된다.

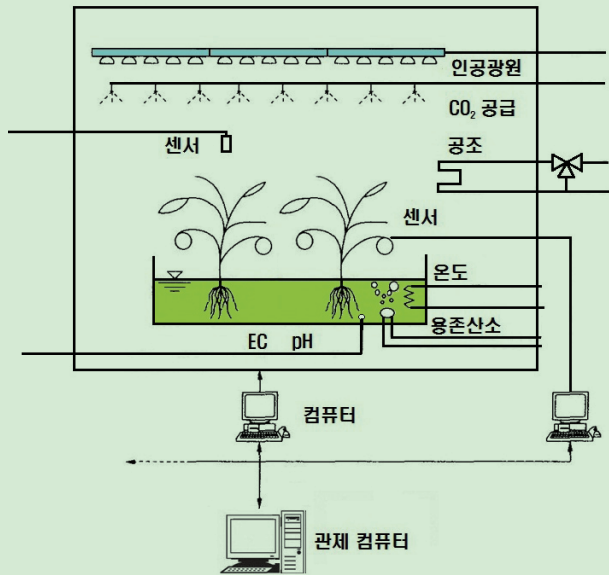


〈그림 2-46〉 식물공장 제어 구성도

식물공장에서의 환경제어는 재배환경의 최적화를 의미한다. 따라서 환경요소와 식물 상태를 정밀하게 측정 및 진단하기 위한 센서가 필요하고 각 제어요소인 온도, 습도,

이산화탄소(CO₂), 빛, 공기유동, 배양액 등을 효과적으로 제어하기 위한 소프트웨어 및 하드웨어 기술의 뒷받침이 필요하다.

식물 생장은 온·습도, 빛, 풍속, 이산화탄소(CO₂) 농도, 양액 등 환경요인의 영향을 받는다. 이러한 환경요소를 인위적으로 제어해 식물의 생장촉진, 생산성 증대, 품질 향상 및 생장 균일화 등이 가능해진다. 식물의 생장과 관련된 환경은 크게 지상부와 지하부 환경으로 구분한다. 지상부 환경은 온도 및 습도, 이산화탄소(CO₂) 농도, 광원 등이다. 지하부 환경은 양액 EC(전기전도도)와 pH(수소이온농도), 양액 온도, 양액 내의 용존산소 농도 등이다.



〈그림 2-47〉 환경제어 시스템 구성의 예

환경제어용 센서

지상부 환경제어용 센서로는 빛, 온도, 습도, 이산화탄소(CO₂) 센서가 있으며, 양액 제어를 위한 센서로는 pH, EC, 이온, 산소, 수위 센서가 있다. 주요 계측센서 및 제어수단은 표 <2-18>과 같다.



〈표 2-18〉 환경요소의 주요 계측센서 및 제어수단

구분	환경요소	계측센서	제어 수단
지상부 환경	빛	조도센서 광양자센서	인공광
	기온	열전대 측온저항체	공조, 난방, 냉방
	습도	전자식습도센서 건습구온도계	공조, 가습, 제습
	이산화탄소(CO ₂) 농도	적외선 가스센서	공조, 이산화탄소 공급
	풍속	열선풍속계 회전형 풍속계	공기순환
지하부 환경	지온, 수온	열전대 측온저항체	양액 가온, 냉각
	pH	pH센서	알칼리 또는 산 공급
	EC(전기전도도)	전기전도도센서	농후액 공급 또는 희석
	용존산소	용존산소센서	통기, 냉각

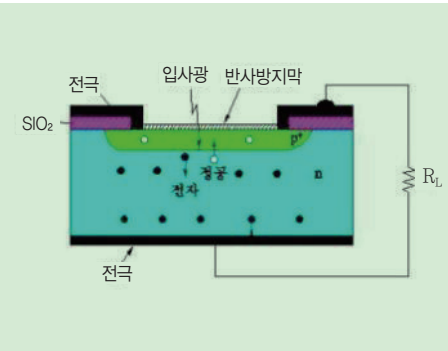
가. 광센서

광센서는 광원의 질과 양을 측정한다. 온실 외부의 빛은 일사량센서로 측정하고, 태양광 또는 인공광원의 광양자속은 광양자센서로 측정한다.

광센서의 종류에는 일사량센서, 광양자센서, 조도센서 등이 있다. 일사량센서는 300~2,500nm 영역의 태양광 복사에너지를 측정하는 센서로, 전천일사계(Pyranometer)라고 불리며, 단위는 W/m²이다. 광양자센서는 태양광 또는 인공광원의 광양자속을 측정하는 센서로, 400~700nm 영역의 광합성유효광양자속밀도(PPFD, Photosynthetic Photon Flux Density)⁴⁾로 나타내며 단위는 μmol/m²/s이다. 조도 센서는 눈의 감도를 기준으로 하여 측정한 방사속(광속 밀도) 밀도를 측정하는 센서로, 단위는 lx이다.

식물공장용 광센서로는 광양자(Quantum)센서가 적당하다. 식물의 광합성량이 광양자 수에 비례하기 때문에 광합성유효광양자속을 측정한다. 광양자센서는 조도센서보다 가격이 비싸므로 조도를 측정하여 광합성유효광양자속을 환산하기도 한다.

광센서는 입사된 빛의 복사에너지, 광양자속 또는 조도 등의 측정대상을 결정한 후 파장영역을 고려하여 선택한다. 농업용 광양자센서는 0~2,500μmol/m²/s±5%, 조도센서는 0~100klx±5%이면 사용 가능하다.



광양자센서

광양자센서 원리

〈그림 2-48〉 광센서

〈표 2-19〉 사용 가능한 광센서 사양

센서명	사 양
조 도	○ 측정방법 : Photodiode ○ 측정범위 : 0~50kLx ○ 정확도 : < 6% ○ 작동환경 : -30℃ ~+50℃
광양자	○ 측정방법 : 실리콘 광전지 ○ 측정범위 : 0~2,500$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ○ 정확도 : < 5% ○ 작동환경 : -25℃ ~+55℃

♣ 센서 표기 의미

- 정확도(Accuracy) : 참값에 근접한 정도
- 정밀도(Precision) : 측정의 재현성 정도
- 분해능(Resolution) : 장치가 인식할 수 있는 최소 측정치 증가 단위
- 반응속도(Response Time) : 자극이 주어진 순간부터 반응이 일어날 때까지의 시간
- 측정범위(Range) : 하나의 계측기로 측정할 수 있는 범위

Tip.

v1 광합성유효광양자속밀도(PPFD, Photosynthetic Photon Flux Density)

녹색식물의 광합성에 효과적인 400~700nm 파장영역에서 단위시간당, 단위면적당 들어가는 광양자의 양을 몰수($\text{mol} = 6.02257 \times 10^{23}$)로 나타낸 것

나. 온도센서

온도센서는 접촉유무에 따라 접촉형과 비접촉형이 있으며, 통신방식에 따라 유선식과 무선식으로 구분한다. 가장 널리 사용하는 온도센서는 열전대(Thermocouple)나 측온저항체(RTD, Resistance Temperature Detector)센서이다.

열전대는 서로 다른 두 종류의 금속도체를 폐회로가 형성되도록 결합하고 금속선의 접합점을 가열(또는 냉각)시킬 때 생기는 **제벡효과**¹⁾로 인해 발생하는 열기전력을 이용한 온도센서이다.

열전대의 특징은 다음과 같다.

첫째, 빠른 응답으로 비교적 시간지연이 적다.

둘째, 넓은 범위의 온도측정이 가능하다.

셋째, 특정 지점 또는 작은 공간의 온도측정이 가능하다.

넷째, 온도가 기전력으로 감지되어 측정, 조정, 증폭, 조절, 변환 등이 가능하다.

다섯째, 다른 온도센서와 비교하여 가격이 저렴하고 쉽게 이용할 수 있다.

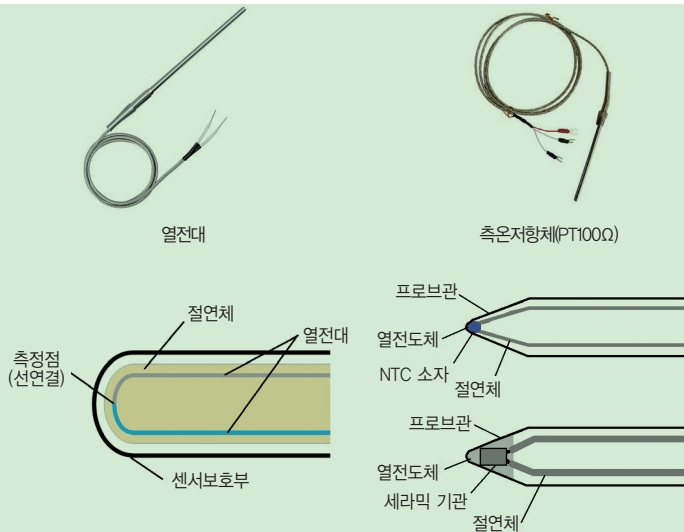
 <표 2-20> 사용 가능한 광센서 사양

종 류	기 호	사용온도범위	정확도	특 징
크로멜-알루멜	K	-200~1,200℃	±0.5℃	산화에 강하고 환원에 약하다. 고온 측정에 적당하다.
철-콘스탄탄	J	-150~600℃	±1.0℃	산화에 약하고 환원에 강하다. 가격은 싸지만 녹슬기 쉽다.
구리-콘스탄탄	T	-200~300℃	±0.5℃	값싸고 저온 특성이 좋다. 균질하며 환원성에 적합하다.
백금-로듐	R	-50~1,400℃	±0.25℃	안전성이 좋고 표준용으로 적합하다. 가격이 비싸다.
크로멜-콘스탄탄	E	-200~700℃	±0.75℃	열기전력이 크고 값이 싸다. 측정 온도 범위가 넓다.

측온저항체는 금속 도체의 전기저항이 온도 변화에 따라 달라지는 현상을 활용한 온도센서이다. 측온저항체는 감도가 좋고 안정성과 재현성이 우수하다. 온도 측정 방법에는 2선식, 3선식, 4선식이 있으며 3선식이 많이 이용된다. 저항선은 100Ω(옴)의 백금선을 주로 사용하는데 화학적, 물리적으로 우수한 성질을 가지고 있어 정밀

한 저항값을 얻을 수 있다. 온도가 상승하면 저항값이 증가하는데, 온도 측정범위는 $-200\sim 600^{\circ}\text{C}$ 정도이다.

정확한 온도측정을 위해서는 측온저항체 선정이 중요하다. 온도를 정밀하게 측정하기 위해서는 녹슬음(부식), 기계적 충격, 기타 환경조건 등에 따라 저항체 소자, 보호관, 예상되는 열 저항 등으로 구조 및 고정(설치)방법 등을 고려해야 한다.



〈그림 2-49〉 온도센서

 〈표 2-21〉 사용 가능한 온도센서 사양

센서명	사 양
온도센서	○ 측정방법 : 백금저항, 써미스터, 열전대, 반도체 온도센서 ○ 측정범위 : $-20\sim +60^{\circ}\text{C}$ ○ 정확도 : $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ○ 반응시간 : 5초 ○ 작동환경 : $-30\sim +80^{\circ}\text{C}$

Tip.

v1 제백효과

두 종류의 금속 또는 반도체의 양끝을 접합하여 거기에 온도 차를 주면 회로에 열기전력이 발생하는 것

온도센서 설치 및 측정 시 주의사항은 다음과 같다.

첫째, 낮 동안 태양복사나 야간 자기복사에 의한 영향을 받지 않도록 백색도장이나 알루미늄 은박지 등으로 복사 막이를 설치한다.

둘째, 공기와의 열교환을 좋게 하려면 열용량이 큰 감온부를 가진 온도계를 사용할 때에는 강제통풍이 필요하다.

셋째, 지표면 근처의 기온은 수직 방향으로 차이가 크기 때문에 통풍이 잘되는 넓은 잔디밭 위에 백열등을 설치하여 지상 1.5m 높이에서 측정한다.

넷째, 잎의 온도(엽온)나 덮는 소재(피복재)의 온도는 0.1mm 이하의 열전대를 순간접착제 또는 접착테이프를 뒷면에 부착해서 측정한다.

다. 습도센서

습도란 습기를 정량적으로 표현한 것으로, 기체 1m³ 안에 포함된 수증기의 양을 g 단위로 표시한 것이 절대습도이다. 일반적으로 사용하는 습도는 상대습도(Relative Humidity, RH(%))를 말하고 이는 공기 중의 수증기분압과 포화수증기분압과의 비를 백분율로 표시한 것이다. 습도 측정에는 물 분자나 수증기가 가지는 고유한 물리적인 성질을 이용하는 것과 흡습성 물질에 물 분자가 흡착되어 물질의 물리적 성질변화를 측정하는 두 가지 방법이 있다.

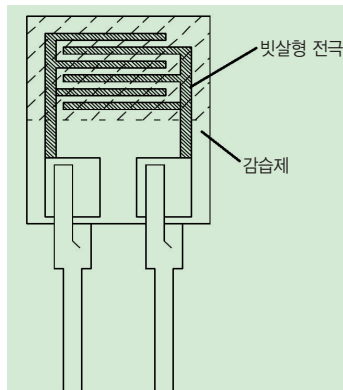
습도센서는 크게 전기저항식과 정전용량식이 있으며, 그밖에 세라믹식, 전해질식, 고분자식, 수정진동자식, 반도체식 등의 센서가 있다.

전기저항식은 습도 변화에 따라 전극 간의 전기저항의 변화를 측정하는 것으로 고분자 전기저항식과 세라믹 전기저항식이 있다. 이 방식의 센서는 측정범위가 넓고 정전용량식에 비해 구조가 단순하여 대량 생산이 가능하고 가격이 저렴한 장점이 있으나, 온도 특성이 정전용량식에 비해 커서(0.5%RH/℃) 온도 보정이 필요하다.

정전용량식은 습도 변화에 따라 전극 간의 전기용량의 변화를 측정하는 것으로 고분자식이 많이 사용된다. 낮은 습도에서도 습도 감지가 가능하고 응답 속도가 빠르지만 구조가 복잡하고 제조가 어려우며 정전용량 변화량이 적으므로 약간의 용량 값 변화로도 오차가 커지는 단점이 있다.



전기저항식 습도센서



센서 구조

〈그림 2-50〉 습도센서

☔ 〈표 2-22〉 사용 가능한 습도센서 사양

센서명	사 양
습도센서	○ 측정방법 : 습구온도계, 세라믹식, 고분자식, 반도체식 ○ 측정범위 : 0~100% RH ○ 정확도 : $\pm 3\%$ RH ○ 반응시간 : < 10초 ○ 작동환경 : $-30 \sim +80^{\circ}\text{C}$

☔ 〈표 2-23〉 습도센서의 종류

구분	검출범위	정밀도	검출 원리
세라믹식	소결체 · 후막	0~100% RH 2% RH	양성자전도에 의한 저항변화측정
	박막	0~98% RH 1~3% RH	유전율 변화에 의한 용량 및 임피던스(교류 회로에서 인가 전압 및 회로에 흐르는 전류의 비율) 변화
전해질식	12% RH 이상	1~3% RH	이온전도에 의한 저항 또는 흡습평형 온도변화
고분자식	0~100% RH	2% RH	전기용량변화측정
수정진동자식	0~100% RH	0.5% RH	수분흡착에 의한 공진주파수 변화
반도체식(MISFET)	0~100% RH	1% RH	수분흡착에 의한 FET전류 변화

습도센서 설치 및 측정 시 주의사항은 다음과 같다.

첫째, 건습구식이 저렴하며 정밀도가 높으나 풍속 영향을 받으므로 기류이동이 적은 실내에서는 통풍형 건습구계를 사용하는 것이 바람직하다. 통풍 속도는 2.5~5m/s 정도가 적당하다.

둘째, 건습구식 습도 측정 시에는 습구가 마르지 않도록 주의한다.
셋째, 고분자식 습도센서의 소자(센서부)에 직류전압을 가하지 않는다.
넷째, 센서부는 이슬맺힘 및 물기를 피한다.

라. 이산화탄소(CO₂)센서

이산화탄소(CO₂)는 작물의 생장촉진을 위해서 식물공장뿐만 아니라 시설재배용 온실에서도 중요한 환경요소의 하나이다. 시설 내 이산화탄소(CO₂) 농도를 효과적으로 제어하기 위해서는 정확한 측정이 필요하다.

이산화탄소(CO₂) 농도는 비분산적외선(NDIR)법, 열전도법 및 질량분석법에 의해 측정할 수 있다. 이산화탄소(CO₂)센서는 CO₂가 적외선에 대해 특정한 흡수 스펙트럼을 갖는 것을 이용하여 농도를 구하는 비분산적외선(NDIR)방식이 주로 사용된다. 식물공장의 이산화탄소(CO₂)센서는 적외선 흡수식 이중센서가 적합하고, 측정 정확도를 높이기 위해서는 센서 검출부에 실내 공기를 유동시키기 위한 팬을 설치한다.



〈표 2-24〉 사용 가능한 이산화탄소(CO₂)센서 사양

센서명	사 양
이산화탄소(CO ₂) 센서	○ 측정방법 : 적외선흡수식, 세라믹식, 고분자식, 반도체식 ○ 측정범위 : 0~3,000ppm($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) ○ 반응시간 : < 30초 ○ 정확도 : $\pm 2\%$ ○ 작동환경 : 0~+50℃

마. pH센서

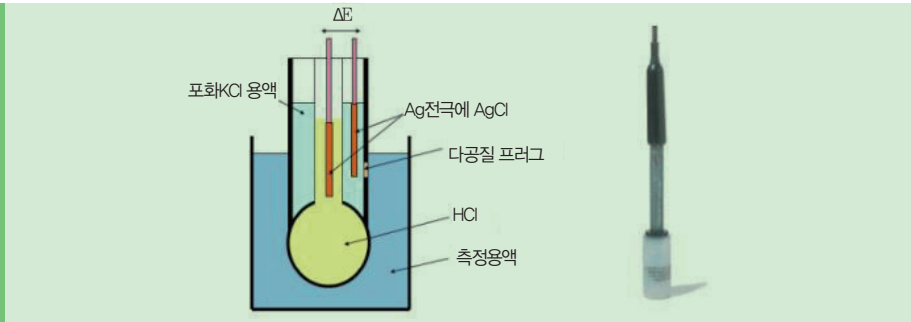
pH는 수용액 중의 수소이온(H⁺)농도를 나타내며, 산성의 정도를 나타내는 값 pH 7을 중성이라 하고 이보다 작을 때는 산성, 클 때는 알칼리성(또는 염기성)이라 한다. 작물은 적정 범위의 pH에서 생육이 양호하고 강산성, 강알칼리성에서는 생육이 불량해진다.

뿌리 주변(근권)의 적합한 산도의 범위는 pH 5.5~6.5로, 이 범위를 벗어나면 양분의 흡수 및 이용도가 저하되며, pH 4 이하에서는 뿌리가 손상되고 pH 7 이상에서는 인(P), 철(Fe), 망간(Mn) 등의 흡수가 저해된다.

수경재배에서는 양액을 조성할 때는 양액의 농도를 조정한 후 산과 알칼리 용액을 서서히 더해 pH를 조절한다. 양액의 pH를 낮추기 위해서는 황산이나 질산을, pH를 높이기 위해서는 수산화나트륨이나 수산화칼륨을 이용한다.

pH센서는 보통 유리전극식센서를 사용하는데, 유리박막의 양쪽에 수소이온 농도에 따른 전위차를 검출하여 측정하는 방식이다. 유리막형 pH센서 구조는 유리관의 끝부분에 반구 모양의 유리박막(전극막)이 있으며, 그 내부에 유리전극 내부액과 내부전극이 있다. 내부전극에는 리드선이 있고 이것이 계기와 맞물려 있다.

측정 정확도를 높이기 위해서는 주기적으로 센서를 보정할 필요가 있다. 보정이 불가능하거나 응답성이 불량하면 센서를 교환한다.



〈그림 2-5〉 pH센서

바. EC(전기전도도)센서

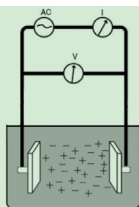
EC센서는 양액농도를 간접적으로 측정하는 센서이다. 전기전도도(EC)는 단면적 1cm^2 , 거리 1cm 의 평행전극 간 용액의 전기저항 역수로, 단위는 mS/cm (Siemens)나 dS/m 이다. 용액 내 전기 흐름은 용액 내 이온량의 영향을 받는데 이온량이 많아지면 전기가 통하기 쉽다. EC가 크다는 것은 용액 중의 이온량이 많아 양분 농도가 진하다는 것을 의미한다. EC는 배양액의 이온 조성 변화가 크지 않기 때문에 양액의 EC를 측정, 조절해 양액 중에 포함되어 있는 이온농도를 일정하게 유지시킨다.

양액재배에서 많이 사용하는 EC센서는 2개의 전극사이에 낮은 교류전압을 걸어 전극 사이에 흐르는 전류를 측정하는 원리이다. EC센서는 취급이 쉽지만 양액온도에 따라 $2\%/^{\circ}\text{C}$ 정도 EC가 변한다. 따라서 온도 보정이 가능한 EC센서를 사용하는 것이 바람직하다. 사용 도중 정밀도 저하를 방지하기 위해서는 약 2개월마다 전극을 세척

한다. 수경재배용 EC센서는 0~5dS/m 또는 0~10dS/m 범위이면 적당하다.



전극식 EC센서



측정원리

〈그림 2-52〉 EC센서

사. DO(용존산소농도)센서

뿌리가 정상적으로 자라는데 필요한 에너지는 호흡에 의해 얻어지며, 온도가 높을수록 생육이 왕성하여 산소요구도는 높아지지만 용존산소량은 감소한다. 용존산소량이 부족하면 인(P), 철(Fe), 칼슘(Ca), 망간(Mn) 등의 흡수가 저해되고 에틸렌 생성이 많아져 뿌리가 말라 죽는다.

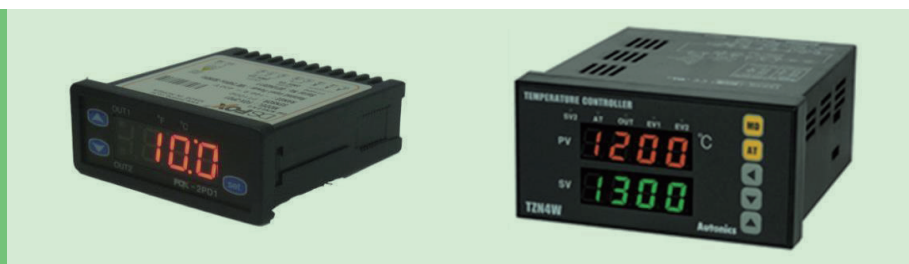
일반적으로 양액의 용존산소 농도는 타이머 등으로 양액을 순환시켜 적절한 농도를 유지한다. 용존산소농도 계측에는 전기와 화학적 방법으로 측정하는 격막전극식센서가 사용된다. 전극부는 테프론 등의 얇은 막과 음극, 양극, 전해액 등으로 구성된다. 전극은 약 1개월마다 세척하고, 전해질과 격막의 교환주기는 약 3개월이다. 격막을 강하게 닦으면 파괴되기 때문에 부드러운 형짚이나 휴지 등으로 가볍게 닦거나 붓을 물에 적서 막을 가볍게 청소한다.

제어기

제어기(제어장치)는 식물공장 등 시설 내·외부 기후 및 미기상(일정 지역의 기상) 환경의 상호 관련성을 컴퓨터가 인지·계산하여 작물의 최적 생육환경이 조성될 수 있도록 제어하는 장치이다. 제어기는 센서 정보와 작물 재배를 위한 환경목표에 따라 환기장치, 냉난방기, 가습장치, 물주기(관수)장치 등을 제어한다. 제어기의 종류로는 자동조절기, PLC, 전용 제어기 등이 있다.

가. 자동조절기

자동조절기는 양을 표시하며 자동적으로 조절하는 기능을 가진 계기로 온도, 습도, 압력, 출력 등을 제어하는 장치이다. 종류로는 천측창, 환기팬, 냉·난방기 등을 제어하는 온도조절기와 제습기, 가습기, 공조기 등을 제어하는 습도조절기 등이 있다.



ON-OFF 온도조절기

PID 온도조절기

〈그림 2-53〉 온도조절기

ON-OFF 온도조절기는 설정온도와 실온의 온도편차에 의해 출력되는 ON-OFF 제어동작으로 천측창, 환기팬, 냉난방기 등의 작동기를 제어한다. 난방의 경우 측정된 실내온도가 설정값보다 낮으면 난방기가 작동되고, 반대로 측정값이 설정값에 비해 높으면 난방기의 작동이 중지된다. 따라서 설정온도를 중심으로 하여 높고 낮음의 물결이 생긴다. 온도가 높아져서 정지되는 시점과 낮아져서 가동되는 시점 사이를 동작 간격 또는 조절감도라고 하며 동작간격이 좁으면 물결은 작아지나 ON-OFF가 자주 반복되어 전자개폐기, 전자밸브 등의 수명이 짧아진다.

PID 온도조절기는 ON-OFF식 온도조절기의 단점을 보완한 것이다. PID 온도조절기는 제어 대상의 특성에 따라 P(비례), I(적분), D(미분) 동작을 조합한 것으로, 지연시간이 있는 제어대상에 대해서도 제어가 우수하다. PID 온도조절기는 제어 대상, 제어 환경에 따라 적절한 PID 파라미터(매개 변수)를 선정한다. 보통 PID 파라미터는 소프트웨어에 의해서 이득^{v1}의 설정이 자동으로 이루어지는 오토튜닝(Auto Tuning) 기능

Tip.

v1 이득

증폭기·수신기 등에서 출력량의 입력량에 대한 증폭도를 데시벨(dB) 단위로 나타낸 것

을 이용하여 설정한다.

PID 제어란 P 동작(편차에 비례한 신호를 내는 비례 동작), I 동작(잔류 편차를 제거하기 위한 신호를 내는 적분 동작), D 동작(응답을 신속히 하기 위한 미분 동작)을 동시에 하는 것을 말한다. 비례 동작은 편차에 비례한 동작으로 설정치를 중심으로 파형이 매끄럽게 제어되게 하고, 적분 동작은 설정값에 대한 오차를 자동적으로 수정하고 미분 동작은 외란에 대한 응답속도를 빠르게 한다.

컨트롤러 사용상 주의사항은 다음과 같다.

첫째, 정격/성능 범위에서 사용한다.

둘째, 릴레이 접점부의 개폐용량 정격값을 초과하는 부하에 사용은 금한다.

셋째, 청소 시 물, 유기용제의 사용은 피하고 물기가 없는 마른 수건으로 청소한다.

넷째, 온도센서 연결 시 단자의 극성을 확인한 후 배선을 정확하게 연결한다.

다섯째, 가연성 가스, 폭발성 가스, 습기, 직사광선, 복사열, 진동, 충격 등이 있는 장소에서 사용하지 않는다.

나. PLC(Programmable Logic Controller)

PLC는 환경제어용 제어기기 뿐만 아니라 식료산업 분야의 생산자동화라인, 자동차 산업, 제철, 제강 등 전기 및 자동화설비에 사용되는 범용 컨트롤러이다.

PLC가 개발되기 전에는 타이머, 릴레이(Relay), 카운터(Counter)가 자동제어의 전부였다. 산업설비가 커지고 단위가 커지면서 타이머, 릴레이, 카운터만으로 공정에 따른 장비의 가동을 감당하기에는 어렵고 제어반의 크기도 커지고 효율도 떨어지게 되었다. 반도체 기술의 발전과 마이크로프로세서의 개발로 이들 수백 개의 타이머와 릴레이 기능을 손바닥만 한 회로 기판에 프로그램을 할 수 있도록 만든 것이 PLC이다.

PLC는 프로그램이 가능한 컨트롤러로, 기존에 사용하던 제어반 내 릴레이, 타이머, 카운터 등의 기능을 반도체 소자로 대체하고 시퀀스 제어와 연산 제어가 가능한 제어장치이다. PLC는 LS산전, 삼성, 미쓰비시, 지멘스, 사이몬, OMRON 등 국내·외 많은 기업에서 생산하고 있다.

PLC의 특징은 다음과 같다.

첫째, 릴레이, 카운터, 타이머, 래치 릴레이 등의 기능을 프로그램으로 처리한다.

둘째, 데이터 처리가 쉽다(논리, 산술, 비교연산 등).



셋째, 자가 진단 기능(이상처리 신호 출력)을 갖고 있다.

넷째, 시퀀스 진행상황 및 내부 논리상태 모니터링이 가능하다.

다섯째, 원거리 제어가 가능하다.

여섯째, 프로그램의 저장 및 변경이 쉽다.

일곱째, 컴퓨터와의 정보교환이 가능하다.

1) 컴퓨터와의 연계 활용

PLC는 확장성, 안정성, 범용성이 우수하지만 입력부와 표시부가 없기 때문에 자체만으로는 모니터링이 어렵다. 따라서 환경을 감시하고 제어값을 변경하기 위해서는 컴퓨터와의 연계가 필요하다.

각종 제어에 관련된 설정값은 컴퓨터의 키보드로 입력하고, 계측 및 제어에 관련된 수치는 모니터에 표시된다. 환경제어에 컴퓨터를 활용하여 온도, 습도, 이산화탄소(CO₂), 빛, 배양액 등 환경을 모니터링하고 제어한다. 또한 많은 제어기와 연결이 가능하므로 여러 곳의 환경을 동시에 관리할 수 있고 인터넷에 접속하여 멀리 떨어진 곳에서도 감시·제어가 가능하다.



〈그림 2-54〉 PLC의 종류

2) PLC 사용 시 주의사항

PLC 기종은 입력점수와 출력점수, 메모리 용량, 입력 종류, 출력기기의 종류, 구동용량, 확장성, 통신지원 등을 고려하여 선택하여야 한다. 설치 시 주의사항은 다음과 같다. 첫째, PLC 전원은 차폐 변압기 및 노이즈 필터를 사용하고 접지는 전용 접지한다. 둘째, 동력선과 신호선은 분리한다. 셋째, 동력선은 PLC로부터 격리한다. 넷째, 배선은 가급적 짧게 한다. 다섯째, 출력기기에서 발생하는 서지 전압을 억제하기 위한 서

지킬러 등의 서지^㉔ 보호기를 설치한다.

다. 전용 제어기

전용 제어기는 일종의 소형 컴퓨터로, 정보를 처리하는 CPU, 메모리, 타이머, 입/출력 단자 등이 하나의 칩에 집적된 마이크로컨트롤러가 내장되어 있다. 전용 제어기는 터치패드나 키패드를 이용하여 입력이 가능하고 온도, 습도 등이 표시되며 센서 입력을 받아 마이크로컨트롤러에 내장된 프로그램에 의해 목표값과 비교·판단하여 작동기를 제어한다.

전용 제어기는 일반조절기에 비해 제어 논리 변경이 쉽고, 복잡한 제어나 자료의 기록 및 연산이 용이하며 가격도 저렴하다. 입력과 출력에 여유가 있으면 장치를 변경하지 않고 프로그램만 변경하여 제어논리를 변경할 수 있다. 그러나 제어기에 고장이 생기면 모듈 전체를 교환해야 하며 장치의 추가 확장이 어려운 단점이 있다.



〈그림 2-55〉 전용 제어기

라. 자동제어반

자동제어반은 기기의 제어에 필요한 조절기(또는 PLC), 표시기, 개폐기, 릴레이, 타이머, 제어 스위치 등을 한 곳에 모아서 감시와 제어조작을 돕는다.

자동제어반은 모든 제어 대상을 자동으로 제어하고, 필요 시 수동 조작도 가능해야 한다. 제어반 안에는 제어기 등이 탑재된다. 중앙감시제어장치로부터 통신망을 통해 오는 각종 명령을 수행하고 현장기기로부터 전달된 각종 정보를 전송하는 기능을 가져야 한다. 제어반은 유지보수와 점검 등을 고려하여 공간 확보와 외부환경에 견딜



수 있는 구조이어야 한다.

제어반 설치 및 유지관리 시 주의사항은 다음과 같다.

첫째, 장래 부하증가에 따른 여유율, 운전조건, 배전방식을 고려하여 부하용량을 산정한다. 둘째, 모든 배선은 단자를 사용하고 배선과 단자대는 식별과 점검이 용이하도록 표시한다. 셋째, 향후 센서 추가나 작동기 추가에 대비하여 확장 가능하도록 예비용을 마련해 둔다.

PLC 등 제어기의 전원과 입출력 기기 및 동력기기는 계통을 분리해서 배선한다. 전압강하를 적게 하기 위해서 가급적 굵은 선(MAX. 2mm²)을 사용한다. 압착 단자의 전선 접속부에는 마크 튜브 또는 절연 튜브를 덮어씌운다. 감전, 오동작을 방지하기 위해 PLC용 접지선과 동력용 접지선은 분리하고 가급적 전용접지로 한다. 접지 공사는 D종 접지(제3종 접지, 접지 저항 100Ω 이하)로 한다. 팬 등으로 냉각하여 제어반 내 온도가 40℃를 넘지 않도록 한다. 제어반 내 상대습도는 5~95% RH가 되도록 한다.

상시 전압은 정격전압의 ±5% 이내가 바람직하다. 상시 전압이 높으면 발열이 많아지고, 낮으면 순간 정전이 발생하는 등 전원이 불안정하게 되어 시스템에 무리가 간다. 따라서 정전압 장치나 무정전 장치를 설치하는 것이 좋다. 전원선에서의 노이즈를 제거하기 위해서는 필터 또는 실드 트랜스를 설치한다. 단자 나사의 조임은 규정 토크 범위에서 실시한다. 단자 나사의 조임이 헐거우면 단락, 화재, 오동작 등의 원인이 된다. 단자 나사를 지나치게 세게 조이면 나사나 기기가 파손된다. 또한 기기 내 단선 조각이나 배선 쓰레기 등의 이물질이 들어가지 않도록 한다.

전선 접속단자의 볼트와 나사는 느슨하지 않은지 점검하고 느슨할 경우 드라이버, 스패너 등으로 조인다. 흙먼지, 이물질 유무, 변형, 변색, 손상여부 등을 관찰하여 이물질 등은 압축공기로 청소한 후 마른 수건으로 닦아내고 손상부품, 변형부품은 교환한다. 월 1회 누전차단기의 시험단추를 눌러 정상적으로 작동되는지 확인한다. 전자식 과전류계전기(EOCR, Electronic Over Current Relays)의 동작상태를 주기적으로 점검 및 확인할 수 있도록 계전기 전면에 테스트버튼을 눌러 내부의 출력릴레이가 차단되는지 확인한다.

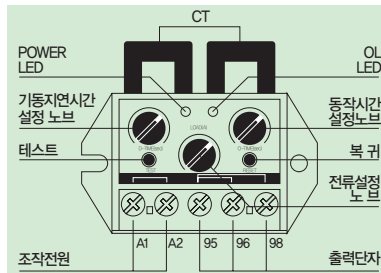
Tip.

v1 서지

도선 또는 회로를 따라서 전달되며 급속히 증가하고 서서히 감소하는 특성을 지닌 전기적 전류, 전압 또는 전력의 과도파형



〈그림 2-56〉 자동제어반



〈그림 2-57〉 전자식 과전류계전기

환경제어시스템

환경제어는 온도, 습도, 이산화탄소(CO₂) 농도, EC, pH 등을 입력하면 컴퓨터에서 신호를 받아 천창창, 차광막, 송풍팬, 양액공급, 냉·난방기 등을 자동으로 작동시킨다. 현재 복합환경제어 기술이 개발되어 일부 활용 중이지만, 제어의 정밀도를 높이기 위한 지속적인 연구가 필요하다.

환경제어시스템의 하드웨어는 센서, 제어기, 작동기, 컴퓨터 등으로 구성된다. 센서는 시설 안과 밖의 기상을 측정하고 제어기는 센서에서 받아들인 정보를 비교·분석하여 작동기에 제어명령을 보낸다. 작동기는 히트펌프, 공조기 등의 냉방장치, 온풍기, 보일러 등의 난방장치, 이산화탄소(CO₂) 발생기, 양액공급장치 등이다. 감시제어부는 환경과 기기작동 감시, 제어 및 설정치를 변경한다. 제어기에는 PLC, 조절기(Controller)와 타이머, 전용 컨트롤러 등이 있으며 자동제어반에 설치된다. 자동제어반은 제어기, 표

최근에는 유선 통신 및 근거리 무선 통신 기술인 지그비(Zigbee)를 이용해 무선센싱 네트워크를 구성하여 온도, 습도, 이산화탄소(CO₂) 등의 환경 및 천창 등의 자동화기기를 스마트폰과 인터넷을 이용하여 실시간으로 모니터링하고 제어하는 유비쿼터스 통합제어시스템도 도입단계에 있다.



식물공장 환경 제어를 위해서는 환경요소에 대한 계측이 필요하다. 환경요소를 측정하여 측정치와 목표치를 비교하고, 측정치가 목표치에서 벗어나면 제어기구를 작동시켜 목표치에 도달하도록 제어한다.

113

가. 온·습도 제어

식물생장에 온·습도를 포함한 적절한 환경관리는 필수적인 요소이며 식물공장에서 작물의 최적 생장을 위해서는 내부 온·습도 제어기술 및 배지의 온·습도 관리가 중요하다.

작물이 자라는데 있어 온도는 지상부의 생리작용에 매우 큰 영향을 미치고 있다. 따라서 작물의 종류 및 생육단계별로 적절한 온도를 유지시키는 것이 필요하다. 또 습도는 작물의 팽압과 증산에 영향을 미치기 때문에 양·수분의 흡수와 전이, 광합성 속도에 영향을 미친다. 이와 같이 공기 중 습도제어는 식물의 생장뿐만 아니라 병해 발생에도 영향을 미친다. 높은 습도에서 뿐만 아니라 낮은 습도에서도 병이 발생하기 때문에 적절한 습도제어가 필요하다. 무균상태에 가까운 완전 밀폐형 식물공장에서는 습도제어가 더욱 중요하다.

냉·난방제어는 센서로부터 입력된 현재 기온과 목표 온도와의 차이를 기준으로 온도조절기, PLC 등과 같은 제어계에서 가동 여부와 제어량을 판단하여 작동기로 해당 출력을 내보낸다. 신호를 받은 온풍난방기와 에어컨의 팬, 보일러의 순환펌프는 On-Off 하거나 보일러, 냉방기 순환펌프의 속도가 조절되어 순환되는 냉·온수 유량과 유속이 조절된다.

입력

•온도센서

동작신호

제어계

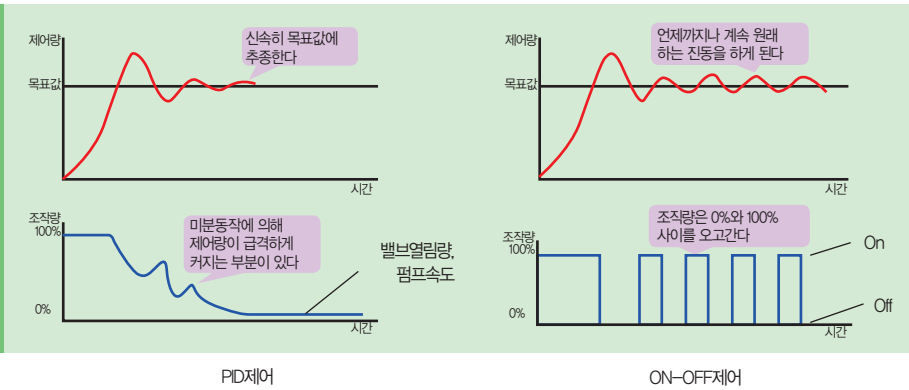
•ON-OFF식 온도조절기
•PID 온도조절기
•PLC, 마이크로컨트롤러

제어량

출력

•온풍난방기 팬
•냉방기 펌프, 팬
•보일러 순환펌프
•창 개폐 모터, 팬

〈그림 2-59〉 온도제어 모식도



〈그림 2-60〉 제어 특성

1) 온도관리

온도관리는 생육적온을 유지하는 것을 목적으로 하지만 출하시기, 주위 환경여건, 경영측면 등을 고려하여 적합한 온도 설정 및 관리가 필요하다.

잎채소·뿌리채소류(엽·근채류)는 주·야간 온도차 없이 일정한 온도를 유지하거나 온도의 변화가 심하지 않게 관리하는 것이 좋다. 열매채소류(과채류)는 모종 기르는 기간 및 본밭(거두기까지 재배하는 밭)에서 주·야간 온도를 다르게 하는 변온관리를 해야 한다. 모종을 기르는 기간에는 꽃눈의 분화가 시작되므로 재배기간에 비해 비교적 높은 온도로 관리하며, 순차적으로 온도를 낮추어 저온으로 순화시켜 아주심기(정식)에 대비하도록 한다.

최적온도(적온) 범위에서 주간 최적온도의 큰 값을 오전에, 작은 값을 오후에 적용하고, 야간의 최적온도에는 큰 값을 전야반에, 작은 값을 후야반에 적용하는 것이 바람직하다.



〈표2-25〉 잎채소·뿌리채소류(엽·근채류) 온도지표

작물	기온(℃)		
	최고한계	최적온도	최저한계
시금치	25	20~15	8
무 우	25	20~15	8
배 추	23	18~13	5
샐러리	23	18~13	5
쑥 갓	25	20~15	8
양상추	25	20~15	8



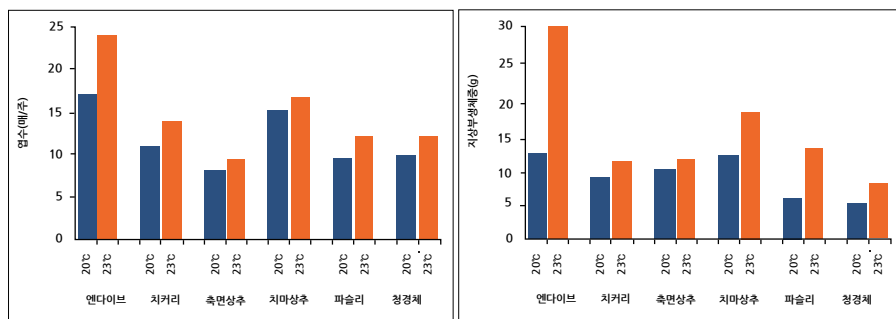
〈표 2-26〉 열매채소류(과채류) 온도지표

(단위: ℃)

작 물	모종 기르기		재배						
	주 간	야 간	주 간		야 간		지 온		
	최적 온도	최적 온도	최고 한계	최적 온도	최적 온도	최저 한계	최고 한계	최적 온도	최저 한계
토마토	25~20	18~10	35	25~20	13~8	5	25	18~15	13
가 지	30~25	20~15	35	28~23	18~13	10	25	20~18	13
피 망	30~25	20~15	35	30~25	20~15	12	25	20~18	13
오 이	25~22	17~12	35	28~23	15~10	8	25	20~18	13
수 박	30~25	20~18	35	28~23	18~13	10	25	20~18	13
온실 멜론	30~25	22~18	35	30~25	23~18	15	25	20~18	13
참 외	30~25	22~17	35	25~20	15~10	8	25	18~15	13
딸 기	25~20	20~15	30	28~20	13~8	5	25	18~15	13

상추가 자라는데 적합한 온도는 월평균기온이 15~20℃이며, 알들이(결구, 잎이 여러 겹으로 겹쳐서 둥글게 속이 드는 것)에는 10~16℃가 적합하다. 씨앗이 싹트는데 최적의 온도는 15~20℃로, 지나치게 온도가 낮으면(8℃ 이하) 싹트기(발아)가 늦어지고, 30℃ 이상에서는 싹트기(발아)가 극히 나빠진다. 생육기간 중 온도가 높아지면 꽃대 자람(추대), 쓴맛의 증가, 생리적 장애 및 여러 가지 병이 걸리기 쉽다.

그런데 온도는 작물의 성장량과 성장속도를 결정하는 요소로써 인공광형 식물공장의 온도 관리는 전력소요 등 운영비에 결정적인 영향을 미친다. 따라서 식물공장의 경영효율을 최대화하는 온도관리가 필요하다. 식물공장 온도 조건을 23℃ 조건에서 재배했을 때 20℃에 비하여 생육속도가 빨라져 엽수의 발생이 많고, 생체중이 증가하여 수량이 향상되므로 재배기간을 단축할 수 있다. 그러나 23℃ 온도에서는 생육속도가 빠르기 때문에 저광도에서는 도장하여 상품성이 떨어지기 쉬우므로 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이상의 광도가 요구된다.



〈 온도 조건에 따른 쌈채소류 엽수 및 지상부 생체중 〉



〈축면상추〉

〈치마상추〉

〈 광도 조건에 따른 쌈채소류 지상부 생체중 및 초장(23℃ 온도 조건) 〉

《채소 GAP재배 지침서》(농촌진흥청, 2006년)에는 상추 등 쌈채류와 배추 등 잎과 뿌리를 먹는 채소(엽근채소), 고추 등 가지과 채소, 수박 등 박과 채소, 결구상추(잎이 여러 겹으로 겹쳐서 둥글게 속이 드는 상추) 등 기타 채소에 대한 온도, 햇빛 요구도, 물 요구도, 비료 요구도의 생리적 특성에 대해 소개되어 있다. 그 중 결구상추와 상추의 단계별 온도관리는 다음과 같다.

○ 결구상추

싹트는 단계 : 15~20℃ (24℃ 미만)

가식 단계 : 낮 22~23℃, 밤 15~17℃, 지온 18~20℃

정식 단계 : 낮 22~23℃, 밤 14~15℃, 지온 15℃

재배 단계 : 생육적온 낮 21~23℃, 밤 14~17℃, 지온 13~18℃

꽃눈 분화 및 꽃대 자람(추대) : 적산온도 1,400~1,700℃

○ 상추

싹트는 단계 : 15~20℃

가식 단계 : 15~20℃

정식 단계 : 15~20℃

재배 단계 : 생육적온 낮 15~20℃, 밤 10~15℃

인공광 식물공장 내에서 쌈 채소를 생산하고자 할 때, 작물별로 적절한 온도와 양액 농도조건에서 재배하는 것이 좋다. 광량 $200 \pm 20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 야간온도 $18 \pm 1^\circ\text{C}$, 일장 12/12간(주/야)로 관리하였을 때 작물별 적절한 온도와 양액 농도조건은 다음과 같다.



온도조건 20~30℃에서 양액 농도를 1.5~2.5dS/m 정도로 관리하면 생육이 좋은 작물은 뉴비트이고, 양액 농도를 2.0~2.5dS/m 정도로 약간 높이는 것이 좋은 작물은 청경채, 썩갯, 적다채이다. 온도를 25~30℃ 정도로 관리하고 양액 농도를 2.0~2.5dS/m 정도로 관리하면 생육이 좋은 작물은 홍쌈추, 적겨자, 적치커리이다. 온도를 30℃로 높게 관리하고 양액농도를 1.5~2.0dS/m으로 관리하면 생육이 좋은 작물은 진뽕로라이고, 1.5~2.5dS/m에서는 엔디브, 독섬적촉면, 2.0dS/m에서는 적근대, 2.0~2.5dS/m 에서는 꽃케일이다. 홍쌈추, 적치커리, 썩갯은 양액 농도가 낮은 1.5dS/m에서 잎에 황화 증상이 발생(엽록소 함량 감소)하여 2.0~2.5dS/m로 관리하는 것이 좋다.

 <표 2-27> 엽채류 적정 온도 및 양액 농도조건

온도(℃)	양액농도(dS/m)	작물
20~30	1.5~2.5	뉴비트
	2.0~2.5	청경채, 썩갯, 적다채
25~30	2.0~2.5	홍쌈추, 적겨자, 적치커리
30	1.5~2.0	진뽕로라
	1.5~2.5	엔디브, 독섬적촉면
	2.0	적근대
	2.0~2.5	꽃케일

※ 생체중, 엽록소 함량기준

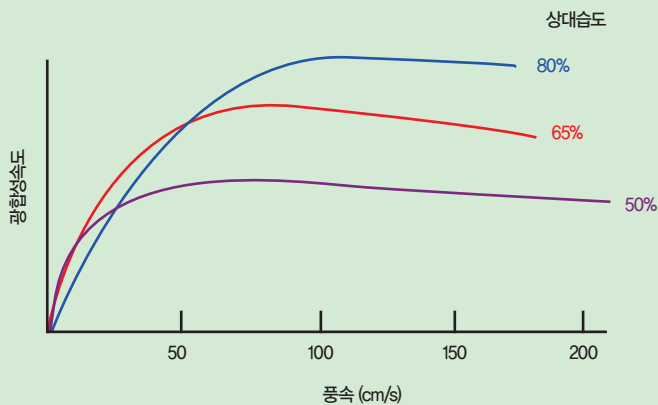
식물공장은 인공광원으로부터 발생하는 열로 인해 여름은 물론 겨울에도 냉방이 필요하다. 야간 기온은 식물의 호흡으로 인한 에너지 소모를 억제하기 위해서 주간보다 낮게 설정한다. 여름철에는 야간에도 바닥면이나 구조재로부터의 방열과 외부로부터의 열 유입(벽면을 통한 관류열 등)이 있어 냉방이 필요하다. 인공광 식물공장의 경우, 겨울철 야간에는 바닥면이나 구조재로부터의 방열로 벽면이 단열되어 난방을 할 필요가 없거나(무난방) 혹은 약간의 난방으로 온도조절이 가능하다.

2) 습도관리

실내 상대습도는 식물생장에 중요하며, 식물생장에 적절한 상대습도는 식물마다 다르지만 상대습도 범위는 50~80%이다. 상대습도가 낮아지면 수분 증발이 촉진되어 잎 내 수분함량이 저하된다. 이로 인해 숨구멍(기공)의 열림이 적어지게 되고 수분 증발이 억제된다. 그러므로 이를 방지하기 위해 습기를 더해주어야(가습)한다. 습도가 높을 경우에는 온도를 높여주거나 히트펌프의 냉방기 가동으로 상대습도를 낮춘다. 주간에서 야간으로 바뀔 때 온도가 낮아지면 상대습도가 상승하므로 습기를 제거해야(제습)한다. 실내 공기가 건조하거나 습기가 많을 때에는 곰팡이병, 회색 곰팡이병 등이 발생할 수 있지만 식물생장에 적합한 범위로 습도를 제어하면 병해 발생을 억제할 수 있다.

습도	작물의 상태
20% 이하	잎의 증산량이 지나치게 증가하여 심할 경우 말라죽는다.
40% 이하	광합성 억제 시작
80% 이하	광합성 작용의 장애 발생 병균의 번식이 쉬워진다. 식물체 내병성병을 건디는 성질) 저하 식물체 세포 및 형태의 가체변이(품질저하 초래)

〈그림 2-6〉 습도와 작물 상태



〈그림 2-62〉 풍속과 습도가 오이의 광합성에 미치는 영향

(〈완전제어형 식물공장의 비용절감 수법〉, Takatsuji, 2012년)

습도환경 개선에는 제습과 가습의 두 가지 방법이 있으며, 제습은 제습기를 이용하기도 하지만 자연광 식물공장에서는 환기를 이용하여 실내 습도를 낮추거나 온도를 높여 상대습도를 낮춘다. 냉각제습은 냉방기 내에서 실내 수증기를 결로시켜 외부로 배출하여 제습하는 방법으로 절대습도, 상대습도 모두 낮아지지만 작물체의 증발산에 걸 맞는 제습을 해도 큰 폭으로 습도를 낮추기는 어렵다. 적극적인 제습을 위해서는 전용 제습기 도입을 검토할 필요가 있다. 가습은 미스트 분무, 세무냉방, 초음파식 또는 가열식 가습기를 이용할 수 있다.

상대습도											
Temp C	100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
15	0.0	0.8	1.7	2.5	3.4	4.2	5.1	5.9	6.8	7.6	8.5
16	0.0	0.9	1.8	2.8	3.7	4.6	5.5	6.4	7.3	8.2	9.1
17	0.0	1.0	2.0	2.9	3.9	4.9	5.8	6.8	7.8	8.8	9.7
18	0.0	1.0	2.0	3.1	4.1	5.1	6.2	7.2	8.2	9.3	10.3
19	0.0	1.1	2.2	3.3	4.4	5.5	6.6	7.7	8.8	9.9	11.0
20	0.0	1.2	2.4	3.5	4.7	5.9	7.0	8.2	9.4	10.6	11.7
21	0.0	1.2	2.4	3.7	4.9	6.2	7.4	8.6	9.9	11.1	12.4
22	0.0	1.3	2.6	3.9	5.3	6.6	7.9	9.2	10.5	11.9	13.2
23	0.0	1.4	2.8	4.2	5.6	7.0	8.5	9.9	11.3	12.7	14.1
24	0.0	1.5	3.0	4.5	5.9	7.4	8.9	10.4	11.9	13.4	14.9
25	0.0	1.6	3.2	4.8	6.4	8.0	9.5	11.1	12.7	14.3	15.9
26	0.0	1.7	3.4	5.1	6.7	8.4	10.1	11.8	13.4	15.1	16.8
27	0.0	1.8	3.5	5.3	7.1	8.9	10.7	12.4	14.2	16.0	17.8
28	0.0	1.9	3.8	5.7	7.6	9.5	11.4	13.3	15.1	17.0	18.9
29	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0
30	0.0	2.1	4.2	6.4	8.5	10.6	12.7	14.8	17.0	19.1	21.2

제습

가습

(그림 2-63) 온도에 따른 적정 상대습도

나. 이산화탄소(CO₂) 농도 제어

이산화탄소(CO₂) 공급은 대부분 액화탄산가스를 사용하고 있다. 작물은 수분을 제외하면 80~90%가 탄산가스의 화합물로 구성되어 있고, 뿌리가 땅속에서 흡수하는 질소, 인산, 칼륨 등의 화합물은 10% 내외이며, 모든 작물은 공기 중에 약 300ppm인 탄산가스를 원료로 하여 광합성을 한다.

식물공장의 경우와 같이 빠른 시간 안에 많은 작물을 재배하기 위해서는 공기 중의 탄산가스 농도인 300ppm보다 농도가 높은 환경을 만들어 주어야 한다.

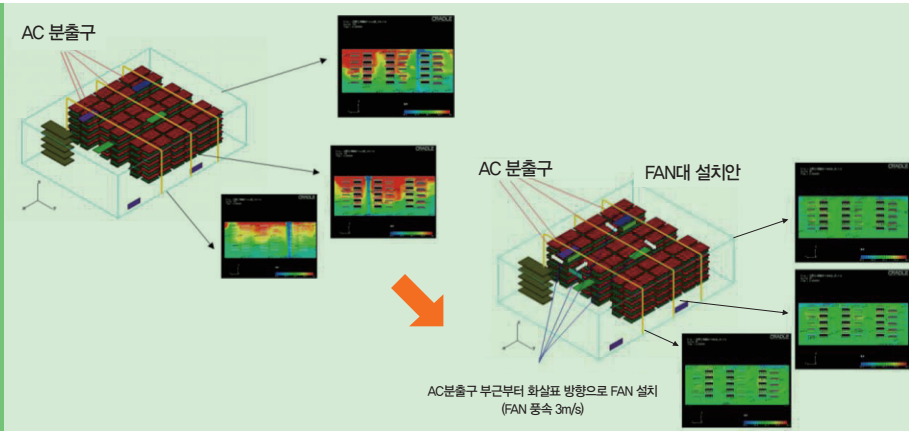
이산화탄소(CO₂)를 공급하기 위해서는 액화탄산가스나 프로판가스를 연소시키는 이산화탄소(CO₂) 발생기를 사용한다. 액화탄산가스는 순도가 높고 불순물이 적지만 가격이 높다. 연소식은 불완전 연소나 고온 연소에 의해 아황산가스(SO₂), 일산화탄소(CO), 질산태질소(NO) 등의 유해 가스가 발생하여 식물에 가스 장애를 유발하기도 한다. 따라서 연소식을 사용하는 경우에는 가스관 부위의 일산화탄소(CO)를 측정하여 불완전 연소 시 실외로 유해가스를 배출할 수 있는 장치를 설치한다.

이산화탄소(CO₂) 농도는 실내의 이산화탄소(CO₂) 농도를 계속하여 빛을 쬌이는 기간 동안 농도에 의해 제어한다. 다만 이산화탄소(CO₂) 농도가 너무 높으면 작물이 웃자라서 늙음(노화)이 촉진되므로 700~1,500ppm(외기는 약 350ppm) 범위로 제어한다.

다. 기류속도 및 기류분포 제어

풍속이 약해지면 잎 안으로의 이산화탄소(CO_2) 확산계수^{v1}가 적어지고, 반대로 풍속이 높아지면 잎을 덮고 있는 공기층(엽면 경계층)이 얇아져서 잎 안으로 이산화탄소(CO_2)가 퍼지기 쉬워진다.

외부와 차단된 시설에서는 식물 잎의 표면에서 일어나는 이산화탄소(CO_2)흡수나 증산이 바람이 없는 상태에서 이루어지기 때문에 기류속도를 수십cm/sec로 유지하는 것이 필요하다. 기류속도가 빠르면 생육이 불량해지거나 잎이 서로 스쳐 손상된다. 따라서 공조설비를 갖춘 식물공장에서는 기류속도를 일정 수준으로 제어하는 것이 중요하다. 특히 덕트에서 내뿜은 차가운 바람이 직접 식물에 닿지 않도록 설계해야 한다. 상추에 칼슘(Ca)이 부족하면 성장점 부근에 생리장해의 하나인 끝마름(팁번, Tib Burn)이 발생하는데, 성장점 부근으로 바람을 보내(송풍) 증산량을 늘려 이를 피할 수 있다(고토(後藤), 1992년). 식물공장 안의 작물생산은 일정 품질의 상품을 한꺼번에 출하하는 것이 중요하므로 재배장소에 따라 생육에 차이가 없도록 기온과 기류속도를 균일하게 제어하는 것이 중요하다. 다음은 5단 재배 베드로 구성된 다단 식물공장의 온도분포 시뮬레이션 분석결과이다. 재배 베드 높이가 약 2.4m이고 천정형 히트



〈그림 2-64〉 다단 식물공장의 에어컨디셔너의 분출구 부근 팬의 설치 유무에 따른 온도분포 시뮬레이션
(제2회 도시형식물공장 국제 심포지엄 자료집, 도시형식물공장연구회, 2009년)

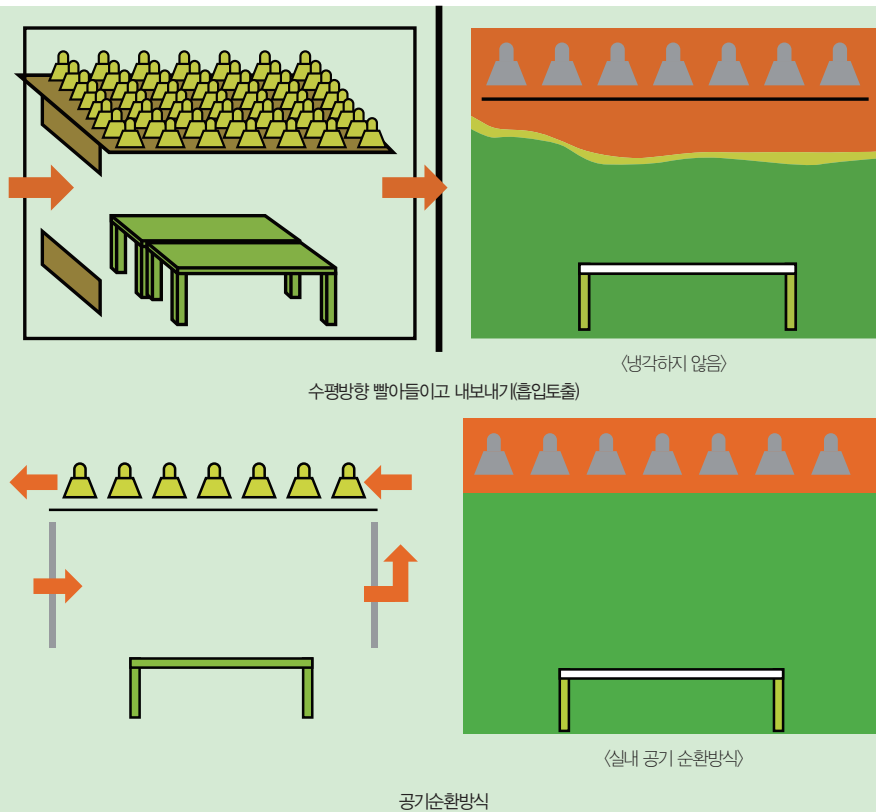
Tip.

v1 확산계수

확산(퍼짐)의 속도를 정하는 계수

펌프 분출구가 4곳에 설치되어 있는 경우 강제 환기팬이 있고 없음에 따른 분석결과, 실내 공기의 유동성이 확보되지 않을 경우 광원으로부터의 열이 순환되지 못해 재배 베드 간의 온도 차이는 7~10℃까지 발생할 수 있다.

각 단에 덕트를 설치하거나 소형 팬을 설치하여 수평방향으로 빨아들이고 내보내기(흡입토출)하면 온·습도와 풍속을 균일하게 유지할 수 있다. 식물 주변의 지나치게 많은 습기를 방지하고 잎을 덮고 있는 공기층(엽면 경계층)을 제거하여 광합성을 촉진하기 위해서는 0.5% 정도의 기류가 필요하다.



〈그림 2-65〉 기류 방식 및 광원 냉각 유무에 따른 온도분포

(《식물공장 비즈니스 전략과 최신재배기술》, 기술정보협회(일본), 2009년)

라. 먼지, 잡균 제거

식물의 병 발생을 억제하여 청정채소를 생산하기 위해서는 공조에 의해 공기 속에 떠다니는 먼지나 잡균을 제거해야 한다. 인공광 식물공장은 공조기를 사용하기 때문에 공조기에 장착된 필터로 입자가 큰 먼지 등을 제거할 수 있다. 그러나 일정 크기 이상의 먼지나 잡균은 제거되지 않는다. 식물공장에서 병충해나 세균의 침입을 피하기 위해서는 공조설비를 통해 외부로부터의 곤충 침입을 차단하는 것이 필수적이다.

7 수경재배

수경재배의 정의 및 특성

수경재배(Hydroponics)란 토양을 사용하지 않는 대신 영양소가 들어있는 수경액 속에 뿌리를 담가서 식물을 생장시키는 것이다. 물과 양분을 별도로 주지 않고 양분이 첨가된 양액으로만 재배한다고 해서 양액재배, 무토양재배, 용액재배 등의 명칭이 있으나 수경재배로 통일하기로 했다.

식물공장은 노지재배에 비해 작업의 자동화를 통한 노동절약(생력화), 작업환경의 개선, 수량증대와 품질향상 등을 도모할 수 있다. 따라서 청정환경에서 연중 안정생산이 필요한 식물공장에서는 수경재배 방식이 바람직하다. 수경재배는 토양재배와 달리 어디서라도 재배가 가능하고 **연작 피해¹⁾**를 피할 수 있어, 같은 장소에서 같은 작물을 오랜 기간 재배할 수 있다. 수경재배는 자연에 순응하며 작물을 생산하는 토양재배의 불리한 점을 극복하기 위하여 개발된 재배방법으로, 다음과 같은 조건들이 갖추어야 생산성을 높일 수 있다.

첫째, 각종 시설설치에 많은 자본이 소요된다.

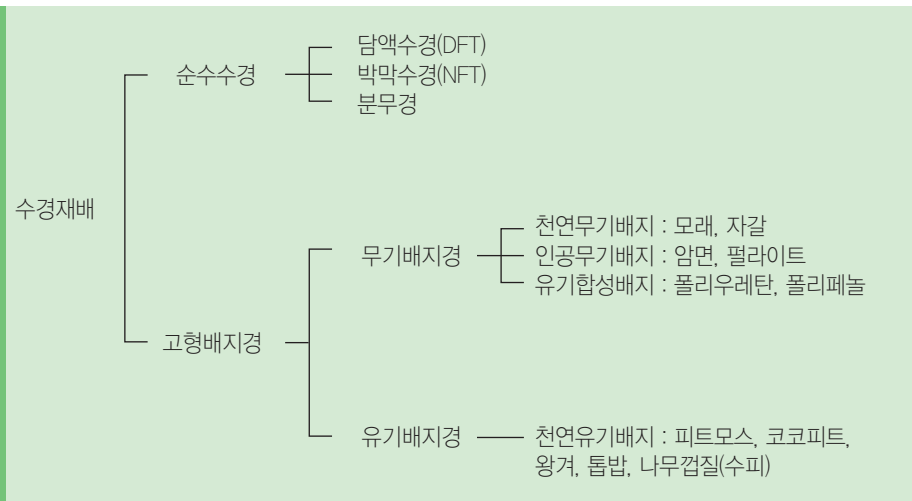
둘째, 배양액의 조제, 농도조절, 환경관리 등 작물 영양생리와 물리·화학분야에 대한 지식과 재배경험이 필요하다.

셋째, 수경재배용 품종 개발이 미흡하여 재배가능 품종이 제한되어 있으며, 품종 및 생육단계에 따라 양액의 조성고 농도를 다르게 관리해야 한다.

넷째, 토양재배와는 달리 식물의 지하부는 **완충능²⁾**이 작은 배지에서 배양액으로 재배한다. 온도, 수분, 용존산소, 용수수질, 수온, 양분농도, pH 등이 환경변화의 영향을 받기 때문에 재배환경 관리에서 정밀성과 많은 노력이 필요하다.

수경재배의 분류

수경재배는 배지 사용여부에 따라 크게 순수수경과 고행배지경으로 분류한다. 순수수경(Water Culture)은 배지를 사용하지 않고 배양액에 직접 뿌리를 노출시켜 재배하는 방식으로 담액수경, 박막수경, 분무경이 있다. 현재 식물공장은 순수수경 방식이 주를 이룬다.



〈그림 2-66〉 수경재배 방식의 분류

가. 담액수경(DFT, Deep Flow Technique)

담액수경은 재배 베드에 양액을 채워 뿌리가 배양액으로 발달하여 양분을 흡수하는 방식이다. 일부 식물공장에서 이 방식으로 재배하고 있지만, 배양액이 많이 필요하고 청결한 재배조 관리가 어렵기 때문에 박막수경(NFT) 방식을 선호하는 경향이 있다.

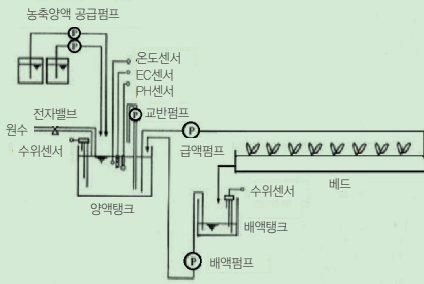
Tip.

v1 연작 피해(연작장해)

해마다 계속 같은 작물을 재배해 작물이 피해를 입는 증상

v2 완충능

외부로부터 어떤 물질이 흙에 가해졌을 때 영향을 최소화할 수 있는 능력으로, 완충용량이라고도 한다.

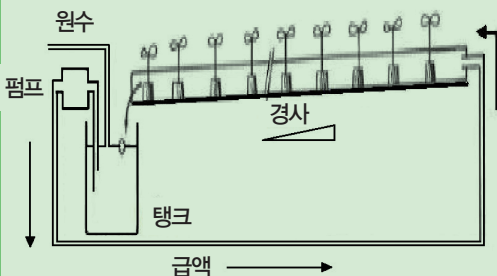


〈그림 2-67〉 담액수경(DFT) 구조 및 재배

나. 박막수경(NFT, Nutrient Film Technique)

박막수경은 2~20mm의 깊이로 배양액을 흘려보내 재배하는 방식으로 NFT 재배라고도 한다. 뿌리 사이에 흐르는 양액은 뿌리에 충분한 산소를 공급하기 위해 얇은 막을 형성시킨다. 기본구조는 재배 베드, 탱크, 양액 공급장치 등으로 구성된다. 베드의 재료는 PE필름, PVC, 스티로폼, 알루미늄 등이 있다. 담액수경과는 달리 베드 안에 배양액이 고여 있지 않거나 소량의 배양액이 지속적으로 흐른다.

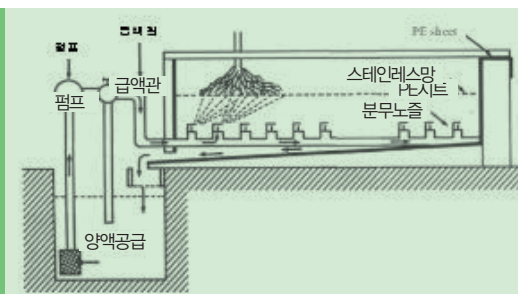
박막수경의 장점은 비료와 물 손실이 적고 환경 변화에 따라 식물 생육을 조절할 수 있어, 식물공장에 적합한 재배방식의 하나라고 할 수 있다. 시설비가 적게 들고 설비와 관리작업이 간편하지만, 공급되는 배양액의 양이 적어 환경의 영향을 받기 쉽고, 전기나 설비에 오류가 발생하면 식물체에 큰 피해를 주기 때문에 정밀한 배양액 관리가 필요하다.



〈그림 2-68〉 박막수경(NFT) 구조 및 재배

다. 분무경

분무경(Aeroponics)은 배양액을 작물의 뿌리에 직접 뿜어 재배하는 방식으로, 담액수경에서 발생하는 뿌리 주변(근권)의 산소부족을 보완하기 위하여 고안되었다. 배지 안에 급액배관과 분무노즐을 설치하여 뿌리에 배양액을 간헐적으로 분무하기 때문에 뿌리 주변(근권)의 산소부족이 발생하지 않는다. 장치의 기본구성은 배지, 배양액 탱크, 분무노즐을 포함한 급액장치 및 자동 급액제어장치이다.



〈그림 2-69〉 분무경 구조 및 재배

분무경의 장점은 다른 순수수경 방식에 비해 배양액 탱크가 작아도 되고, 박막수경과 마찬가지로 배양액 조성변경이 쉽다. 또한 분무경재배는 작물의 생육을 촉진시키고 **재식밀도^{v1}**를 높일 수 있다. 그러나 초기 시설투자비, 뿌리 주변(근권) 온도변화 제어, 분무노즐 막힘이나 베드가 새는 현상 등이 단점으로 지적되고 있다. 또한 재배구조상 정전이나 고장에 의해 배양액 순환펌프가 정지하면 식물체 뿌리 생장에 피해를 주기 쉽다.

Tip.

v1 재식밀도

단위면적당 심은 포기(의 수)

양액조성과 관리기술

가. 배양액 조성(필수원소 및 수질)

작물 생육에 반드시 필요한 무기원소를 필수원소라고 한다. 필수원소는 16가지로 이 원소들이 부족하거나 지나치게 많이 흡수되면 여러 가지 과부족현상이 일어난다. 필수원소 중 탄소(C), 산소(O), 수소(H), 질소(N), 칼륨(K), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 인(P), 황(S) 등 9가지는 식물 체내 분포농도가 높은 원소로, 다량원소(Macro-element)라고 한다. 특히 질소, 인, 칼륨은 작물 요구도가 높아 흙에 부족하기 쉽다. 염소(Cl), 철(Fe), 망간(Mn), 붕소(B), 아연(Zn), 구리(Cu), 몰리브덴(Mo) 등 7가지는 미량원소(Micro-element)이다.

작물은 이산화탄소(CO₂)로부터 탄소를 얻고, 산소와 수소는 물(H₂O)로부터 취하며, 다른 원소는 흙에 분포하는 천연 또는 비료로 공급된 무기염류를 통해 얻는다. 그러나 수경재배는 흙 없이 재배하는 방식으로 이들 필수무기원소를 인공으로 제조한 양액으로 공급한다.

 <표 2-28> 주요 원소의 흡수형태와 공급원

원소명	원소	원자량	원자가	당량 ¹⁾ 무게	흡수 형태
탄소	C	12.0	4	—	CO ₂
수소	H	1.0	1	1	H ₂ O
산소	O	16.0	-2	8	H ₂ O, O ₂ 등
질소	N	14.0	3	—	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺
인	P	31.0	-2	—	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻
칼륨	K	39.1	1	39.1	K ⁺
칼슘	Ca	40.1	2	20.05	Ca ²⁺
마그네슘	Mg	24.3	2	12.15	Mg ²⁺
황	S	32.1	6	—	SO ₄ ²⁻
철	Fe	55.9	+2, +3	—	Fe ²⁺ , Fe ³⁺
망간	Mn	54.9	2	27.45	Mn ²⁺
아연	Zn	65.4	2	32.7	Zn ²⁺
구리	Cu	63.5	2	31.75	Cu ²⁺
몰리브덴	Mo	95.9	6	—	MoO ₄ ²⁻
붕소	B	10.8	3	—	BO ₃ ³⁻
염소	Cl	35.5	-1	35.5	Cl ⁻



배양액을 만들 때 잊어서는 안 되는 것이 원수의 수질이다. 보통 지하수나 수돗물을 사용하는 경우가 많다. 원수에 함유되어 있는 칼슘, 마그네슘 등의 비료성분은 비료 공급량에서 그 만큼을 제외시키지 않으면 배양액 내에 이들 이온이 점차로 축적되어 작물생육을 저해할 수 있다. 물론 원수에 유해성분이 함유되어 있는 경우에는 이들 성분을 제거해야 하므로, 원수는 사용 전에 반드시 수질을 분석하여 적정 수질기준을 초과하는지 확인해야 한다.



〈표 2-29〉 수경재배용 원수의 적정 수질기준

(단위 : mg · L⁻¹)

무기성분		우리나라	네덜란드	일본
염도	EC(dS · m ⁻¹)	< 0.5	< 0.5	< 0.3
산도	pH	5.0~8.0	5.0~7.5	5.0~8.0
질소	NO ₃ -N	< 10		< 60
인	P	< 2		< 30
칼륨	K	< 10		< 80
칼슘	Ca	< 40	< 80	< 80
마그네슘	Mg	< 15	< 12	< 40
황산	SO ₄	< 40	< 16	
중탄산	HCO ₃	< 100	< 40	
나트륨	Na	< 30	< 30	< 80
염소	Cl	< 30	< 50	< 200
철	Fe	< 0.5	< 1.0	< 10
망간	Mn	< 0.6	< 0.5	< 1
아연	Zn	< 0.5	< 0.5	< 1
구리	Cu	< 0.01	< 0.06	
붕소	B	< 0.1	< 0.3	< 0.7

(우리나라 서울시립대, 네덜란드 PBG, 일본 치바농시)

Tip.

v1 당량

화학반응에서 어떤 물질량에 대해 상당하는 다른 양을 말한다. 원소 당량은 산소원자 1/2mol(몰)과 화합하는 다른 원소의 그램수, 즉 원소의 원자량을 원자기로 나눈 것이다.

나. 배양액 관리 기술

1) 농도(EC) 관리

배양액 농도는 전기전도도(Electrical Conductivity, EC)로 나타내고, 이는 1cm^2 의 전극판이 1cm 의 거리로 떨어져 있을 때의 전기저항치의 역수이다. 단위로는 $\text{mmho}\cdot\text{L}^{-1}$ 나 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 대신에 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 를 사용한다. EC는 배양액 내 모든 이온농도를 합산하여 나타내는 수치이다. 무기양분 분석은 비싼 장비와 분석전문가가 필요하므로 농가에 서는 EC를 측정하여 배양액 조성의 변화를 관찰할 수 있다. EC는 전이온농도라고도 하며, 각 무기성분의 함량을 정확하게 알 수 없기 때문에 정기적으로 전문기관에 배양액 분석을 의뢰해야 한다.

배양액의 전이온농도(EC)와 개별 무기양분농도는 작물의 생육, 수량 및 품질에 영향을 미치므로 배양액 농도관리가 중요하다. 배양액 농도는 작물 종류에 따라 적정 농도가 정해져 있다. 그러나 생육단계나 환경조건에 따라 다르므로 작물별 적정 농도 범위를 기본으로, 생육단계나 환경조건에 따른 영향을 고려하여 배양액 농도를 관리한다. 일반적으로 생육 초기에는 작물의 양·수분 흡수량이 적고 생육이 진전됨에 따라 많아지므로 저농도(표준의 1/3)로 관리하고 생육이 진전됨에 따라 농도를 높여간다. 특히 열매채소류(과채류)는 과일의 비대·수확기, 즉 생식생장기에 접어들면 양분 흡수량이 현저히 많아지므로 배양액 농도를 질게 관리한다. 잎과 줄기의 생육을 촉진하기 위해서는 질소를, 과일 생산을 위해서는 인, 칼륨, 칼슘 농도를 높이는 등 목적에 맞는 성분의 농도 조절이 필요하다. 또한 배양액 농도는 겨울철에는 높게, 여름철에는 낮게 관리하는데 이것은 계절에 따른 수분소비량이 다르기 때문이다. 수분흡수량은 기온과 뿌리 주변(근권) 온도가 높고 일사량이 많을 때 촉진되므로 이러한 조건에서는 배양액 농도를 열게, 겨울철에는 질게 관리한다. 일반적으로 작물별 적정 뿌리 주변(근권) 배양액 농도는 열매채소류(과채류) $2.5\sim 3.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 절화류 $2.0\sim 2.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 잎채소류(엽채류) $1.5\sim 2.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 수준이다. 그러나 광량이 부족한 겨울철이나 이상기후로 충분한 빛을 확보할 수 없을 때는 열매채소류(과채류)에서 $3.0\sim 6.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 질게 관리하기도 한다. 또한 순환식은 비순환식보다 낮게 관리하고 피트모스나 코코피트 등의 유기배지는 낮게, 암면과 펄라이트 등의 무기배지는 다소 질게 관리하는 것이 일반적이다.



2) 산도(pH) 관리

산도(pH)는 용액 내에 존재하는 수소이온(H⁺)의 농도를 나타내는 지표로, 0~14까지의 수치로 나타낸다.

배양액 산도(pH)는 양분의 용해도와 작물의 양분흡수에 직접 영향을 미치며, 대부분의 작물은 토양재배와 수경재배에서 모두 pH 5.5~6.5 범위에서 대체로 생육이 왕성하다. 그 이유는 pH 5.5~6.5 범위에서 대부분의 무기양분의 흡수가 원활히 이루어지기 때문이다. 작물의 이온흡수 특성에 따른 뿌리 주변부분(근권부) 배양액 pH 변화를 보면 작물이 양이온(K⁺, NH₄⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)을 흡수하면 뿌리에서 배양액으로 수소이온이 방출되어 뿌리 둘레(근권)의 pH가 낮아진다. 반대로 음이온(NO₃⁻, SO₄²⁻, H₂PO₄⁻)을 흡수하면 수산이온(OH⁻)이 방출되어 뿌리 둘레(근권) pH가 높아진다. 이러한 pH 변화는 작물적 요인(작물의 종류, 품종), 생리적 요인(생식생장기^❶, 영양생장기^❷), 환경요인(지상부의 온·습도와 광도, 뿌리 주변(근권) 온도)에 따라 배양액 내에 존재하는 양이온과 음이온의 흡수비율이 달라지기 때문이다. 뿌리 주변(근권)의 pH를 적정 수준으로 유지하는 것은 수경재배에서 가장 중요한 배양액 관리 중의 하나이다. 배양액의 pH는 5.5~6.5로 유지하는 것이 좋지만 5.0~7.0의 범위에서도 작물생육에는 지장이 없다. 그러나 pH가 4.5 이하로 떨어지면 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등의 알칼리성 염류가 양액에 녹지 않는다(불용화). pH가 7.0 이상일 경우에는 철이 침전되어 작물 흡수가 어렵고, 8.0 이상이면 망간과 인이 불용화되기 쉽다.

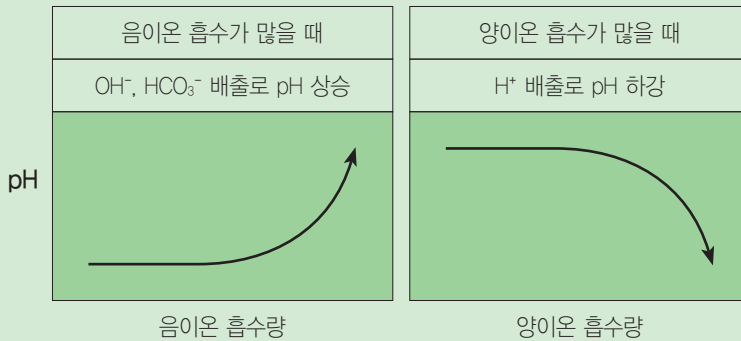
Tip.

v1 생식생장기

유성생식을 하는 식물의 생식기관이 분화해 발달하는 시기

v2 영양생장기

생식생장기에 대응하는 말로 식물이 싹 터 잎과 줄기가 크게 생육단계 시기. 몸자람 시기라고도 한다.



〈그림 2-70〉 이온 흡수에 따른 양액의 pH변화

일반적으로 pH가 낮을 때에는 음이온의 흡수가, 높을 때에는 양이온의 흡수가 원활하다. 배양액 내 질산태질소와 암모니아태질소의 비율도 pH에 영향을 준다. 작물이 암모니아태질소를 먼저 흡수할 때 pH가 낮아지는데 배양액 pH에 따라 원예작물의 질소 흡수특성이 달라진다. 또한 필수원소인 철은 킬레이트^㉔의 형태로 공급하지 않으면 pH가 높아지며 산화철 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 형태로 침전된다. 킬레이트철의 종류에 따라 Fe-EDTA는 pH 7까지, Fe-DTPA는 pH 8까지, Fe-EDDHA는 전 영역에서 사용 가능하므로 상황에 맞춰 철 급원을 선택한다.

높아진 pH를 낮추기 위해서는 황산(H_2SO_4), 인산(H_3PO_4) 및 질산(HNO_3) 등을 사용하며 낮아진 pH를 높이기 위해서는 수산화칼륨(KOH)이나 수산화나트륨(NaOH)을 사용한다. 그 밖에 질산태질소와 암모니아태질소의 비율을 조정하여 pH를 조절하기도 한다. 또한 암모니아태질소($\text{NH}_4\text{-N}$)를 함유한 질산암모늄(NH_4NO_3), 인산암모늄($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), 황산암모늄 ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) 등을 이용하여 비율을 조절한다.

영양생장기 동안에는 질산태질소($\text{NO}_3\text{-N}$)를 주로 흡수하여 뿌리 주변(근권) pH는 계속 상승한다. 그 이유는 영양생장기 동안 식물이 수산이온(OH^-)을 방출하기 때문이다. 따라서 질산태질소의 흡수를 억제할 수 있는 암모니아태질소를 공급해서 뿌리 주변(근권)의 pH 상승을 억제할 수 있다.

그러나 생식생장기 동안에는 식물이 칼륨을 중심으로 양이온을 많이 흡수하여 뿌리 둘레(근권)의 pH가 낮아진다. 이때에 암모니아태질소가 함유된 비료염을 사용할 경우 뿌리 둘레(근권)의 pH가 더욱 더 낮아진다. 이를 방지하기 위해서 중탄산칼륨



(KHCO_3)과 같은 비료를 사용하며 중탄산칼륨은 칼륨 공급원이 될 뿐만 아니라 동시에 중탄산이온(HCO_3^-)이 pH가 낮아지는 것을 방지하여 pH를 안정적으로 유지한다. 배양액 자체의 pH 조절도 중요하지만, 배지의 pH를 먼저 조절하는 것이 합리적 pH 관리 방법이다. 피트모스나 나무껍질(수피)과 같은 강한 산성의 배지를 사용할 때 배양액의 pH로 배지의 pH를 조절하기보다는 사용 전의 배지에 석회를 뿌려 배지 자체의 pH를 높인 후 작물을 재배한다. 암면, 입상암면, 훈탄, 목탄 등의 알칼리성 배지의 경우 배양액의 pH를 5.2~5.7로 다소 낮추어 공급한다. 반면, 펄라이트, 버미큘라이트 등의 중성 및 약산성 배지는 공급하는 배양액의 pH에 비교적 크게 영향을 받으므로 적정 범위로 조절한 배양액을 공급한다.

3) 배양액의 조제순서 및 혼합방법

배양액 조성이 결정되면 필요한 비료의 양을 계산하여 배양액을 조제한다. 배양액을 만드는 방법은 크게 두 가지가 있다. 필요한 비료를 큰 배양액 통에 직접 녹이는 방법과 100~1,000배의 고농도 원액을 만들어 놓았다가 필요할 때마다 희석해서 탱크에 넣는 방법이다. 직접 녹이는 방법은 배양액의 농도가 얇어 침전은 크게 염려하지 않아도 되지만 보편적인 방법은 아니다. 보통 농축배양액을 만들어 희석하여 사용하는데, 조제방법은 아래와 같다.

- ① 비료들을 준비한 다음, 각각의 무게를 $\pm 5\%$ 까지 정확하게 측정한다. 이때 주의해야 할 것은 비료의 처방량은 순도가 100%인 경우의 값이므로 순도를 계산에 넣어야 하며, **조해성^{v2}**이 강한 질산칼슘과 같은 것은 공기와 접촉하면 수분을 흡수하여 무게가 달라지기 때문에 항상 밀봉하여 보관해야 한다.
- ② 탱크는 하나면 되지만 농축배양액 통은 최소한 A, B 두 개를 준비한다.
- ③ 탱크에 소요량보다 10% 정도 적게 물을 넣는다.
- ④ 배양액 통에 적당량의 물을 넣고 비료를 한 종류씩 녹인다. 잘 녹지 않으면 취저

Tip.

v1 킬레이트(Chelate)

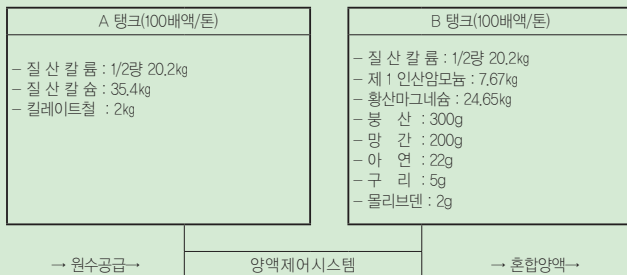
금속과 이온 결합을 하는 능력이 있는 물질. 계가 양쪽 집게발로 잡은 것과 같은 모양으로 결합하는 화학구조를 갖는 화합물을 말한다.

v2 조해성

공기 중에 노출되어 있는 고체가 수분을 흡수해 녹는 현상

어 주거나 온도를 올려 주면 잘 녹는다.

- ⑤ 칼슘염을 황산염 혹은 인산염과 같이 녹이면 침전인 석고(CaSO_4)나 인산2수소 칼슘[$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$]이 생기기 쉬우므로 서로 다른 배양액 통에 넣는다. 즉, 배양액 통 A에는 KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 와 Fe-EDTA를 넣고, 배양액 통 B에는 나머지 비료를 넣어 미량원소를 녹인 후에 다량원소를 녹인다. 질산칼륨은 두 가지 액에 나누어 녹이면 잘 녹는다. 이때 녹이는 순서는 H_3BO_3 , $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 이다. 순도가 낮은 비료를 사용하면 침전이 생길 수 있다는 것을 고려해야 한다.
- ⑥ 배양액 통에 다 녹인 후, 필요할 때마다 희석해서 탱크에 넣는다.
- ⑦ 배양액의 pH를 측정하여, 적정 pH보다 높으면 H_2SO_4 를 이용해 낮추고, 낮으면 KOH으로 높여 준다. pH가 높으면 Fe^{2+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} 등이 불용화되어 식물이 흡수 할 수 없게 된다.
- ⑧ 배양액을 베드에서 5~10분 간 순환시킨 후에 다시 pH를 재서 원하는 값으로 조절한다. 보통 적정 pH는 5.5~6.5 사이지만 작물마다 약간씩 다르므로 작물에 맞추어 조절한다. 전기전도도(EC)를 측정해 배양액 조제가 잘되었는지 확인하는 것도 좋다.



〈그림 2-7〉 야마자키 배양액에 대한 원액 조제 및 양액공급 개략도

각각의 비료는 물에 녹더라도 배양액은 여러 가지 비료를 녹여서 만들기 때문에, 다른 비료와 화학반응을 일으켜서 침전이 생기는 경우가 있다. 특히 진한 배양액을 만들어 두고 사용하는 경우에는 침전이 생기기 쉬우므로 이때는 침전을 형성하는 이온들을 분리해서 만들어야 한다. 침전은 pH에 따라 생성되는 정도가 달라지지만 일반

적으로는 칼슘(Ca^{2+})이 포함된 것과 황(SO_4^{2-})이나 인산이 포함된 것을 합치면 침전이 생기므로 분리해서 녹인 후 보관한다.

다. 양액살균

작물 수경재배 시 병해는 배지의 성질과 상태(성상) 등 배양액 공급방식에 따라 발생 종류에 다소 차이가 있다. 담액식 수경재배에서는 배양액의 순환에 의해 주로 역병, 뿌리썩음병 등이 많이 발생하고 고형배지경에서는 토양 전염성 병해로 풋마름병, 선충 등이 발생한다.

 (표 2-30) 수경재배에서 주로 발생하는 병해

병 명	병 원 균	전 염 방 법	피해정도
잎마름병	Phytophthora infenstans	흙, 공기	심함
뿌리 역병	Phytophthora capsici Phytophthora drechsleri	흙, 물	중간
잘록병	Rhizoctonia solani	씨앗, 흙	약함
뿌리 썩음병	Pythium aphanidermatum Pythium myriothylum	흙, 물	약함
시들음병	Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici	흙, 씨앗	중간
검은점뿌리썩음병	Collectotrichum coccodes	씨앗, 병이 든 식물(이병식물)	약함
풋마름병	Rastonia solanacearum	흙, 물	심함
궤양병	Corynebacterium michiganense	씨앗, 병이 든 식물(이병식물)	약함
모자이크병	Tobaco Mosaic Virus(TMV)	씨앗, 진딧물	약함
연부병	Erwinia aroideae	씨앗, 병이 든 식물(이병식물)	—
반시들음병	Verticillium dahliae	씨앗, 병이 든 식물(이병식물)	—

1) 열처리 시스템

열처리 방식은 배양액 탱크에 모인 배양액의 유기물 입자를 걸러낸 후 탱크에서 열교환기로 이동시켜 소독온도까지 가열하는 방식이다. 열처리 방식은 담배모자이크바이러스나 시들음병균이 97℃에서 10초 동안 단기간 처리로 살균할 수 있다(Runia 등, 1988년).

 <표 2-31> 10초 동안 열처리 후 배양액 내의 감염도

병원균	농도	무처리	열처리	처리온도(℃)
담배모자이크 바이러스	10 ³	3/3	0/3	97
	10 ⁵	3/3	0/3	97
시들음병균	7×10 ⁴ spores/ml	50/50	1/50	94
	7×10 ³ spores/ml	49/50	3/50	94

농촌진흥청 국립농업과학원에서 개발한 전기가열식 살균장치는 전기를 열원으로 하는 가열부, 퇴수되는 양액을 예열하거나 살균된 양액온도를 낮추어 주는 열교환부, 제어부로 구성되어 있다. 병원균 살균시험 결과, 가열온도 70℃ 이상, 3분 동안 처리에서 완전살균이 가능했다. 양액살균장치를 사용하여 25℃의 양액을 70℃로 살균할 경우 1시간에 220L를 처리할 수 있었으며, 양액성분변화도 거의 없어 사용한 양액(폐양액)을 재이용할 수 있을 것으로 판단됐다.

2) 오존처리

오존은 전자 공여체로, 다른 물질을 산화시키며 자신은 환원되는 강력한 산화제다. 10g의 오존으로 1m³의 배액을 1시간 동안 처리하면 효과적이다(Runia, 1994년). 반응이 신속하지만 잉여 반응력은 완전 소멸하며, 킬레이트 화합물이 파괴될 우려가 있다.

 <표 2-32> 오존(20g)처리 1시간 후 배양액 내의 감염도

노출시간(분)	토마토 모자이크 바이러스의 병반 수	곰팡이 수
0	560	33,200
10	—	10,800
15	206	—
30	3	104
45	2	—
60	0	76



3) 자외선 처리

자외선은 파장 100~400nm의 전자기 광선으로 200~280nm 범위의 자외선(UV) 광선은 매우 강력한 살균 효과를 가지며 특히 253.7nm가 가장 효과적이다. 고압등은 200~280nm범위의 파장을 발산(전력소비의 10%만 자외선(UV)으로 전환)하고, 저압등은 253.7nm의 파장을 발산(전력소비의 40%를 UV로 전환)한다. 상업적인 설비에서는 100mJ/cm²의 자외선(UV)을 쏘이는 것이 곰팡이 제거에 효과적이지만 바이러스 등의 완전한 소독을 위해 250mJ/cm²가 필요하다(Runia, 1994년).

수매 전염성 병원균(물을 매개로 전염되는 병원균)의 흙씨(포자)를 죽이는데, 모잘록병균(Pythium ultimum)의 **난포자**^{v1}는 자외선 80mJ·cm⁻², Phytophthora cinnamomi 유주자는 자외선 23mJ·cm⁻², 그리고 후자리움(Fusarium) **유주자**^{v2}는 자외선 100mJ·cm⁻²(100,000m W·sec·cm⁻²)를 쏘였을 때 99% 제거된다. 포자를 효율적으로 죽이기 위해서는 연속적으로 자외선을 쏘이는 것이 필요하다. 그러나 자외선(UV)을 쏘이는 것은 킬레이트철의 유용성을 떨어뜨린다. 킬레이트철의 자외선 분해에 대한 저항성은 Fe-DTPA, Fe-Na-EDTA, Fe-EDDHA 순이다.

4) 과산화수소 처리

과산화수소 처리는 오존보다 산화력이 낮아서 고농도의 과산화수소를 장시간 처리해야 한다. 담배모자이크바이러스는 활성 과산화수소 40ppm 농도에서 99% 이상 제거된다.

5) 모래여과법

모래여과법의 여과효율은 모래 여과층의 두께, 혼합하는 매질(물리적 반응을 한 곳에서 다른 곳으로 전하는 매개물) 종류, 여과속도에 따라 달라진다. 모래여과법은 역병균에는 여과효율이 높지만 시들음병균의 경우, 흙씨(포자) 크기가 작아 하루 3~7m의 속도로 90cm 두께의 석영모래층을 통과시켜야 효과적이다.

Tip.

v1 난포자

진균류의 하나인 조균류 안에서 난자가 수정을 하거나 단위생식을 통해 만들어지는 흙씨(포자)

v2유주자

이끼류 등에서 볼 수 있는 섬모 또는 편모를 갖고 있으며 무성생식을 하는 흙씨(포자)의 일종. 녹조류나 갈조류에서 볼 수 있다.

앞채소류(엽채류) 수경재배

가. 모종 기르기(육묘)

수경재배를 위한 모종 기르는 방법은 씨뿌리기 상자(파종상자)에 씨앗의 싹을 틔워 플러그 트레이나 우레탄 스펀지에 옮겨 심거나(이식), 우레탄 스펀지에 뿌려 양액 모종 기르기를 하거나 플러그 트레이에 뿌려 모종을 기른다. 우레탄 스펀지는 밑에서 물을 주면(저면급수) 수분이 위쪽으로 이동하기 곤란하기 때문에 싹트는 비율(발아율)을 높이기 위해 배지 위쪽까지 물이 차도록 관리한다. 작물의 위쪽에서 물을 뿌리는 두 상관수의 경우는 물이 마르지 않게 물주는 횟수를 늘린다.



〈표 2-33〉 앞채소류(엽채류) 양액 모종 기르는 배지 종류에 따른 싹트는 비율(발아율)

배지 종류	싹트는 비율(발아율, %)					
	다채	청경채	상추	엔디브	적근대	비트
스펀지	1.4	6.9	5.1	13.9	1.4	2.3
암면	87.5	97.2	71.3	85.6	40.3	38.9
코코피트 (코이어)	93.5	99.5	81.5	79.6	35.2	39.4
모판흙 (상토)	92.6	96.3	81.0	82.9	47.7	49.5

※ 온도조건 : 주간 23~25℃, 야간 18~23℃

모종을 기르는 기간(육묘일수)은 작물의 종류, 모종을 기르는 환경, 트레이 규격 등 여러 요인에 따라 달라진다. 상추 등 대부분의 앞채소류(엽채류)는 씨를 뿌린 후 2~3주가 지나 본잎(본엽)이 3~4장 발생하고, 뿌리도 충분히 발달하므로 수경재배 베드에 옮겨 심을 수 있다. 그러나 최근에는 좀 더 어린 모종을 심어 초기 생육을 촉진하여 거두는 기간(수확기간)을 단축하기도 한다. 청경채나 상추는 씨를 뿌린 뒤 약 2주일 후에 아주심기(정식)가 작물생육 촉진에 효과적이다. 그러나 씨앗의 껍질이 단단한 명아주과 작물, 셀러리나 파슬리 등 일부 작물은 싹트는데 드는 기간이 길고 생장속도가 느려서 모종을 기르는 기간이 길어지기도 한다.

 <표 2-34> 모종을 기르는 기간(육묘일수)에 따른 정식 후 생육(정식 후 20일)

작물	모종을 기르는 기간	잎 길이 (엽장)(cm)	잎 수 (no./plant)	잎 면적 (cm ² /plant)	생체중 (g/plant)	마른무게(건물중) (g/plant)
청경채	8, 12	15.84ab	6.0a	154.86ab	4.60a	0.182a
	9, 14	17.24a	6.0a	179.01a	5.80a	0.196a
	10, 18	15.26b	6.2a	150.92b	4.49a	0.100a
상추	11, 12	14.06b	7.2b	112.39b	2.59b	0.10a
	12, 14	17.60a	8.8a	215.35a	5.27a	0.15a
	13, 18	15.60b	8.0ab	161.60ab	3.90ab	0.10a

씨앗의 싹트기(종자 발아)는 빛의 있고 없음과 빛의 색(광질)에 의해 영향을 받는데, 흙덮기(복토) 두께가 두꺼워지면 빛에 의해 싹트기가 유도되는 씨앗(광발아 종자)의 싹트는 비율(발아율)이 급격히 떨어진다. 잎채소류(엽채류)가 싹트는데 적합한 온도는 작물에 따라 차이가 있다. 명아주과 작물은 15~20℃가 적당하며 국화과나 배추과는 20~25℃가 적당한데, 이보다 지나치게 낮은 온도나 30℃ 이상의 높은 온도에서는 싹트기가 불량해진다. 작물의 생육속도와 온도는 밀접한 관계가 있기 때문에 적당한 온도(적온) 범위에서 높은 온도로 관리할수록 자라는 속도가 빨라지기 때문에 모종을 기르는 시간이 줄어든다.

 <표 2-35> 빛 및 온도조건에 따른 명아주과 잎채소류(엽채류)의 발아율(%)

처 리		시금치	근대	비트
빛	온도(℃)			
있음	15	27.7	25.3	58.7
	20	11.3	31.3	59.3
	25	2.0	28.7	34.7
없음	15	27.7	24.0	76.7
	20	13.7	27.3	62.0
	25	2.7	14.0	48.7

※ 24시간 동안 일정한 온도를 유지하고 형광등을 켜고, 싹이 트는 기간(발아기간) : 29일



〈표 2-36〉 빛 및 온도조건에 따른 국화과 잎채소류(엽채류)의 초기 발아율(%)

처 리		잎 상추류				치커리	엔디브	숙갓
빛	온도(℃)	로메인	오크리프	청치마	적치마			
있음	15	0.0	0.0	45.7	93.7	0.0	0.0	0.0
	20	91.7	94.0	90.0	97.7	0.0	36.7	0.0
	25	66.7	74.0	93.3	99.0	46.0	83.0	26.0
없음	15	0.0	0.0	0.3	78.7	0.0	0.0	0.0
	20	93.3	93.3	88.7	97.7	0.0	20.7	0.0
	25	95.0	90.0	91.3	98.7	21.3	81.3	28.0

※ 24시간 동안 일정한 온도를 유지하고 형광등을 켜고, 색이 트는 기간(발아기간): 1일



〈표 2-37〉 빛 및 온도조건에 따른 배추과 잎채소류(엽채류)의 초기 발아율(%)

처 리		다채	경수채	겨자채	다청채	쌈추	잎브로콜리	청경채	케일
빛	온도(℃)								
있음	15	83.3	82.7	3.3	0.0	57.7	69.3	85.7	7.7
	20	99.0	99.3	36.3	64.0	91.0	93.0	98.7	92.7
	25	100.0	96.7	76.3	78.3	89.0	98.3	99.7	94.0
없음	15	96.7	94.3	7.3	2.3	73.7	87.7	98.7	9.7
	20	99.7	99.7	61.7	60.7	89.3	96.3	100.0	93.0
	25	99.7	99.7	75.3	84.0	93.3	98.7	100.0	89.3

모종의 크기는 모종을 키우는 기간(육묘일수)나 비료량(시비량)이 같은 조건에서도 모종 기르는 트레이의 크기에 따라 달라진다. 잎채소류(엽채류)의 모종을 기르는 트레이 크기는 일반적으로 128~288공으로, 트레이의 크기가 크면 모종의 건강상태(묘소질)를 유지하면서 기르는 기간을 연장할 수 있기 때문에 재배기간을 줄일 수 있다.

나. 아주심기(정식)

잎채소류(엽채류) 수경재배는 순수수경 또는 배지경 수경재배 모두 가능하지만 배지 구입의 용이성 및 다 쓴 배지(폐배지)의 처리비용, 운영비 절감 면에서 순수수경재배가 적당하다. 식물공장 시스템에서 수경재배 작물을 심는 거리(재식거리)는 빽빽하게 심는 것이 가능해 가능하여 상추는 15 × 15cm나 15 × 20cm가 무난하지만 10 × 15cm까지도 무방하다. 일반 모판흙(상토)에 씨를 뿌려 모종을 기르는 경우에는 본잎이 3~4장 나왔을 때 모판흙(상토)을 씻어 낸 다음 우레탄 스펀지에 싸서 정식판에 꽂는다. 암면이나 스펀지에 모종을 키운 것은 그대로 정식판에 옮긴다.

다. 재배 특성과 환경

식물공장 재배에 적합한 대부분의 잎채소류(엽채류)는 1년생 혹은 2년생의 호냉성^{v1} 초본작물^{v2}로, 자라는데 적합한 온도는 15~20℃이다. 재배실 안의 온도를 25℃ 이상으로 유지할 때 꽃눈이 분화하기 때문에 온도제어에 유의해야 한다.

잎채소류(엽채류)는 작물의 종류가 다양해 개별적인 생육특성이 밝혀져 있지 않은 것도 있다. 예를 들어 상추는 잎의 분화는 낮 온도보다 밤 온도의 영향을 많이 받는데, 10~15℃에서 잎의 분화가 가장 활발하고 10℃ 이하에서는 잎의 분화가 거의 이루어지지 않는다. 온도가 15℃ 이상으로 상승하면 잎의 분화는 둔화한다. 한편 배양액 온도는 15~25℃로 관리하는 것이 적당한데 여름에는 배양액의 온도가 높아지고 겨울에는 낮아지므로 계절에 따라 배양액의 온도관리에 유의한다.

상추의 광보상점은 1,500lx, 광포화점^{v3}은 25,000lx 이다. 상추는 광발아성(光發芽性) 작물로, 종자를 파종할 때는 복토를 얇게 하여 광투과율을 상승시키면 발아율이 상승한다. 배양액 pH는 5.0~7.0 범위, 전기전도도(EC)는 1.2~1.6 dS/m 범위에서 관리한다.

 **〈표 2-38〉 작물별 최적 액온과 한계온도**

작물명	최고한계 배양액 온도	최적 배양액 온도	최저한계 배양액 온도
상 추	25℃	15~18℃	13℃
토마토	25℃	15~18℃	13℃
딸 기	25℃	15~18℃	13℃
멜 론	25℃	18~20℃	13℃

Tip.

v1 호냉성

작물을 재배하는데 적합한 온도범위가 비교적 낮은 온도(월평균기온 15~18℃ 정도)에서 품질이 좋고 최대수량을 생산할 수 있는 작물

v2 초본작물

줄기가 비교적 연해 목질을 이루지 않아 꽃이 피고 열매가 맺은 뒤에 지상부가 말려 죽는 식물

v2 광포화점

더 강하게 빛을 비추어도 광합성량이 증가하지 않을 때의 빛의 세기

라. 배양액 조성과 관리

배양액 조성은 재배기간에 작물의 양분흡수 특성을 고려해 결정한다. 작물의 양분흡수 특성은 작물의 종류, 재배환경, 생육단계 등 여러 가지 환경조건의 변화로 달라지기 때문에 작물 종류별로 배양액 조성도 다르다. <표 2-39>에서 보는 것처럼 작물이 같은 경우에도 나라별로 배양액 조성이 다르며, 국내에서 개발한 배양액도 연구기관에 따라 다르다. 배양액은 작물의 양분흡수 특성과 작물의 각 양분에 대한 적응폭을 고려하여 만들어야 한다. 기존에 개발된 배양액이 없거나 여러 작물을 한꺼번에 재배하는 경우에는 범용 과별 배양액(국화과, 배추과, 미나리과 등)을 이용한다.

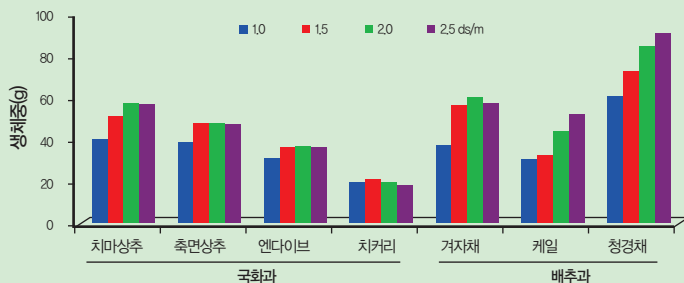


<표 2-39> 작물별 배양액 조성 예

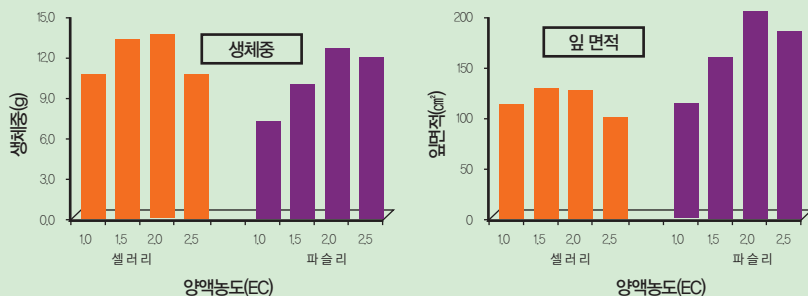
(단위 : me/L)

구분	대상작물	성분농도					
		질산태질소(NO_3^-N)	암모니아태질소(NH_4^+N)	인(P)	칼륨(K)	칼슘(Ca)	마그네슘(Mg)
한국	상추	8.0	1.2	3.6	5.0	3.0	1.5
	쑥갓	12.3	3.2	5.0	5.8	5.0	1.5
	엔디브	13.3	2.4	5.0	7.0	5.6	2.8
	치커리	12.3	3.2	5.0	5.8	5.0	1.5
	잎겨자	13.0	1.0	3.0	5.0	8.0	2.0
		9.5	1.1	3.3	3.2	6.3	2.4
		6.9	2.2	6.5	2.4	4.5	0.7
	미나리	8.0	1.0	3.0	6.0	2.0	2.0
	샐러리	14.0	1.0	3.0	6.0	8.0	4.0
	바실	12.8		3.6	5.8	5.8	3.0
	국화과	16.0		3.4	9.0	4.2	2.0
	배추과	15.2		3.0	6.8	4.8	2.0
	미나리과	15.6		3.2	7.8	5.0	2.0
	백합과	12.8		2.6	6.8	3.8	2.0
일본	상추	6.0	0.5	1.5	4.0	2.0	1.0
	쑥갓	12.0	1.3	4.0	8.0	4.0	4.0
	삼엽채	9.0	1.7	5.0	7.0	2.0	2.0
	샐러리	12.7	1.9	3.6	6.0	6.0	3.2
	바실	17.3		4.0	8.0	8.0	4.0

예를 들어, 국화과와 미나리과 잎채소(엽채)의 경우, 주요 잎채소류(엽채류) 과별 전용 배양액을 이용한 적정 양액농도는 배추과보다 상대적으로 양분요구도가 낮다. 일반적으로 배추과 잎채소류(엽채류)의 전기전도도(EC)는 2.0~2.5dS/m로 관리한다. 국화과의 적정 전기전도도(EC)는 측면상추 1.5 dS/m, 치마상추 2.0 dS/m, 엔디브 1.5 dS/m, 치커리 1.5 dS/m이다. 이처럼 잎채소(엽채) 종류별 전기전도도(EC)가 다양한데, 측면상추에 비해 치마상추의 양분요구도가 높다. 배추과 작물의 전기전도도(EC)는 겨자채 2.0 dS/m, 케일 2.5 dS/m, 청경채 2.5 dS/m이며 미나리과의 셀러리는 1.5 dS/m, 파슬리는 2.0 dS/m이다.



〈그림 2-72〉 국화과, 배추과의 급액농도에 따른 주요 쌈채소의 생체중



〈그림 2-73〉 미나리과 쌈채소 급액농도에 따른 생체중

일반적으로 사용하는 배양액 조성과 필요한 비료량은 <표 2-40>와 같다.



<표 2-40> 주요 엽채류의 작물별 배양액 조성 예

대상작물	비료 성분농도				
	KNO ₃	NH ₄ H ₂ PO ₄	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	MgSO ₄ ·7H ₂ O	NH ₄ NO ₃
상추	505	136.8	354	185	
썩갓	581	190.4	590	185	120
엔디브	707	190.4	661	344	56
치커리	581	190.4	590	185	120

식물공장과 같은 저광도 조건에서는 질소동화계효소의 활성이 낮고 수경재배 시 nitrate형태의 질소원을 주로 사용하기 때문에 체내 높은 질산염 함량이 우려되며, 식물공장 재배 시 저질산염을 함유한 쌈채소류 생산 및 공급체계 확립이 필요하다. 적치마상추의 질산염 저감을 위해서는 적치마상추 수경재배 시 적정 질산태 및 암모니아태 질소 비율을 8:2로 조성하여 공급하는 것이 좋으며, 식물공장에서 포기형 청경채, 청치마상추 및 적치마상추 재배 시 100~200μmol m⁻²s⁻¹조건에서 수확 5~7일 전 양액내 NO₃-N 비료를 결제하거나 1/2배액으로 배양액 농도를 낮추어 공급함으로써 외적 품질 및 생육량의 저하 없이 질산염을 저감시킬 수 있다.



<표 2-41> 질산염 저감을 위한 양액조정 및 지상부 환경

품목	광도	양액조정	온도	습도
청경채, 청치마상추, 적치마상추	100~200 (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	수확 5~7일전 NO ₃ -N 비료결제 또는 1/2배 배양액 공급	23.0±1℃	50~80%

또한, 포기형 청치마상추 재배 시 200~300μmol m⁻²s⁻¹ 광도에서 수확 3일전 양액결제(양액중단)를 통해 외적품질의 저하 없이 생육량이 가장 높으면서 동시에 짧은 시간 동안 식물체내 질산염의 저감시킬 수 있다.



	광도($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		
	100	200	300
질산염 함량	높음 ←————→ 낮음 수확 7일전 양액결제시 가장 낮으며, 200~300$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$에서 수확 3일전 결제시 질산염의 저감효과가 가장 높음.		
생육량	생육량 낮음	수확 3일전 양액결제시 가장 높음.	
비타민 함량	차이없음		수확 3일전 및 5일전 양액결제시 높음
엽록소 함량	낮음 ←————→ 높음		



(단위 : me/L)

대상작물	비료 성분농도				
	KNO ₃	NH ₄ H ₂ PO ₄	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	MgSO ₄ ·7H ₂ O	NH ₄ NO ₃
상추	505	136,8	354	185	
쑥갓	581	190,4	590	185	120
엔디브	707	190,4	661	344	56
치커리	581	190,4	590	185	120

한편 평균 $150\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이하의 저광도 조건하에서 엽채소류를 재배할 경우, 낮은 질소동화계 효소의 활성화와 수경재배 시 질산태질소의 사용에 의한 체내 질산염의 축적을 문제 삼기도 하는데, 이때 수확 5~7일 전 양액내 $\text{NO}_3\text{-N}$ 비료를 결제하거나 1/2 배액으로 배양액 농도를 낮추어 공급함으로써 외적 품질 및 생육량의 저하 없이 질산염을 저감시킬 수 있다. 또한 $200\sim 300\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 조건의 광도에서는 포기형 상추 재배 시 수확 3일 전 양액결제(양액중단)를 통해 품질의 저하 없이 생육량이 가장 높으면서 동시에 짧은 시간동안 식물체내 질산염의 저감효과를 볼 수 있었다.

 <표 2-44> 광환경 및 수확 전 양액결제시기에 따른 청치마상추의 생육

광도 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	양액 결제시기 (DBH) ²	생체중		엽수	엽폭 (cm)	엽장 (cm)	엽록소 농도 (SPAD)	엽면적 (cm^2)
		근중 (g/주)	엽중 (g/주)					
100	Contol	1.25	13.40	16.50	7.25	18.3	26.0	474.5
	7 DBH	1.25	13.45	17.00	7.50	18.0	25.0	458.1
	5 DBH	1.80	13.75	15.00	7.25	17.2	24.2	446.5
	3 DBH	1.50	14.07	18.33	6.60	17.4	25.6	470.0
200	7 DBH	3.77	22.83	20.67	7.50	17.9	27.0	547.6
	5 DBH	3.08	22.03	19.67	7.80	17.9	27.3	515.1
	3 DBH	3.63	35.13	21.00	9.10	19.1	27.8	796.4
300	7 DBH	3.00	26.90	22.33	9.67	17.8	33.3	598.2
	5 DBH	4.13	27.77	22.00	9.70	16.5	32.2	621.5
	3 DBH	4.73	33.77	22.33	9.90	19.1	37.3	711.9
Significance ³								
광도(LI)		***	***	***	***	NS	***	***
양액결제시기(DBH)		*	***	***	***	NS	**	***
LI×DBH		NS	NS	NS	*	NS	NS	*

²DBH(Days before Harvest) : 수확 전 일수

³Probability of significant F values: NS, *, **, *** : non-significant or significant at $p\leq 0.05$, 0.01, or 0.001, respectively.

상기와 같이, 식물공장에서는 수경재배를 위하여 다양한 종류의 영양성분을 포함하는 무기성분의 배양액을 이용하는데, 인공광이나 자연광 식물공장에서 작물을 재배하고 난 후에는 손상엽, 뿌리, 줄기 및 미성숙과 등 다양한 형태의 농업부산물이 다량 발생한다. 이들 농업부산물을 폐기하기 위해서는 노동력과 경비가 소요되며 환경오염의 원인이 되기 때문에 농업부산물의 활용방안이 재고되고 있다. LED 식물공장



조건에서 적치마와 청치마 상추를 재배할 경우 무기성분의 화학비료 사용량을 저감하기 위하여 농업부산물을 활용하여 제조한 EC 0.5~1.5dS/m 및 pH 5.6~5.8의 배양액을 담액방식으로 처리하면 아마자키 배양액 단독 처리시보다 아마자키와 제조 배양액을 혼합처리할때 생체중과 엽수는 감소하지만 SPAD치가 2배 증가하며 혼합배양액 EC를 1.5로 처리하면 엽장이나 엽폭은 아마자키 처리시와 차이가 없다. 따라서 농업부산물을 활용하여 제조한 액비의 영양성분을 파악하고 성분의 안정성을 유지할 수 있는 기술이 개발된다면 화학비료 사용량이나 환경오염을 저감시킬 수 있는 등 인공광 식물공장에서의 활용이 기대된다.

마. 생리장해

식물공장에서 가장 많이 발생하는 생리장해는 잎끝마름증(팁번 현상, Tip burn)으로, 잎끝마름병의 대표적인 증상은 잎채소류(엽채류) 잎 가장자리가 적갈색으로 타들어 가는 것이다. 자연광 식물공장에서는 주로 여름철 온도가 높은 시기에 집중적으로 발생한다. 발생 원인은 온도가 높은 시기에 잎의 활발한 증산작용보다 배양액 온도 상승에 의한 무기양분 흡수가 원활하지 못해 일어나는 체내 칼슘 분배의 불균형이다. 이를 해결하기 위해서는 재배 빛 세기(광강도)를 낮추고 배양액 pH 5.5~6.5 범위, EC 1.2dS/m 이하로 관리한다. 한편 자연광 식물공장에서는 시설 내부를 35% 이하로 빛을 차단해 들어오는 빛의 양을 낮추어 생육과 잎의 증산작용을 억제한다. 가장 실용적인 조치방법은 배양액 온도를 20℃ 이하로 관리하는 것이다.

자연광 식물공장보다 상대적으로 빛 세기(광강도)가 낮은 인공광 식물공장에서 적상추, 적치커리, 적잎겨자 등의 잎채소류(엽채류)를 재배할 때 적색계열의 색소가 나타나는 것이 억제되기도 한다. 특히, 자연광에서 방출되는 자외선(UV, Ultraviolet) 영역이 차단되는 식물공장에서는 자연광 식물공장보다 안토시아닌 형성이 억제되기 때문에 LED와 같이 광질 제어가 쉬운 광원을 이용하여 색소가 나타나는 것을 촉진할 필요가 있다.

2장 인공광 식물공장

1. 인공광 식물공장 종류와 특징

- ▶ 인공광 식물공장은 폐쇄된 공간에서 햇빛 대신 인공광을 이용해 작물을 재배한다.
- ▶ 인공광 식물공장에서 적용하고 있는 수경재배는 박막수경(NTF) 방식이 일반적이며, 일부에서는 식물 뿌리에 양액을 분사하는 분무경 방식을 이용하기도 한다.
- ▶ 인공광 식물공장은 완전 폐쇄형이기 때문에 무농약 재배 및 다단 재배가 가능하다.
- ▶ 단위면적당 생산성이 높고, 생육 기간을 줄일 수 있다. 또한 재배실 안의 온도를 정밀하게 조절할 수 있고, 주간과 야간의 시간을 임의대로 조절할 수 있다.

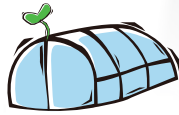
2. 광원 및 조명

- ▶ 인공광 식물공장을 설계할 때 대상작물에 따른 광원의 종류, 개수, 배치, 조명장치 및 조사기술이 중요하며 생산성, 상품성, 경제성 등을 고려하여 광원을 선정한다.
- ▶ 인공광원은 형광등과 LED(발광다이오드)를 주로 사용하고 있으며 메탈할라이드램프, 고압 나트륨램프 등도 사용한다.
- ▶ 빛의 색(광질)은 재배 작물의 줄기 자람에 영향을 미친다. 각 광원이 가지는 빛의 색(광질)을 파악해 광원을 선택한다.

3. 공기조화

- ▶ 공조(공기조화)란 실내 온도, 습도, 기류속도, 가스 조성이나 가스 농도, 먼지 및 불순물 제거 등 공기환경과 배지와 배양액의 지하부 환경을 적절하게 조절하는 것을 의미한다.
- ▶ 공기조화는 빛 쏘임(광조사)와 함께 식물의 연중 생산, 계획 생산이 가능하도록 하는 필수조건이다.
- ▶ 공기조화기는 열 분배방법에 따라 중앙식과 개별식으로 나눈다.
- ▶ 최근에는 에너지 효율이 높은 지열 등 신재생에너지를 열원으로 사용해 냉·난방 성능이 우수한 히트펌프가 보급되고 있다.

핵심만 꼭! 꼭!



4. 자동화

- ▶ 식물공장의 자동화는 파종 전처리, 파종, 육묘, 옮겨심기(이식), 아주심기(정식), 재배, 거두기(수확), 세척, 선별, 포장 등 생산공정을 자동화하는 것과 시설, 환경, 배양액관리 자동화로 나눌 수 있다.
- ▶ 작업공정의 자동화는 인건비 절감과 작업환경 개선효과를 가져오나 초기투자비와 운영비가 소요되므로 경제성을 고려하여 자동화수준을 결정한다.

5. 환경제어

- ▶ 환경제어시스템은 센서, 제어기, 작동기, 컴퓨터 등으로 구성된다.
- ▶ 작물의 최적 생장을 위해서는 온·습도, 이산화탄소(CO₂) 관리가 중요하다.
- ▶ 식물공장을 효율적으로 운영하기 위해서는 빛(광)센서, 온도센서, 습도센서, 이산화탄소센서, pH센서, 전기전도도(EC)센서 등으로 지상부와 지하부 환경을 계측하고 제어기, 작동기에 의해 관리한다.

6. 수경재배

- ▶ 수경재배는 흙을 사용하지 않고 영양소가 들어있는 수경액 속에 작물의 뿌리를 담가 성장시키는 방법이다.
- ▶ 수경재배는 많은 자본이 들고, 배양액 조제, 농도조절, 환경관리 등 작물 영양생리와 물리·화학 분야에 대한 지식과 재배경험이 필요하다.
- ▶ 수량과 품질을 높이기 위해서는 재배작물의 품종 및 생육단계에 따라 양액의 조성 and 농도를 다르게 관리하고 온도, 수분, 양분 농도 등을 정밀하게 관리해야 한다.

++++++
++++++
++++++
++++++
++++++
++++++
++++++

제3장

자연광 식물공장





1. 개요
2. 종류와 특징
3. 광원
4. 냉·난방
5. 자동화
6. 환경제어
7. 수경재배



자연광 식물공장(온실)은 햇빛을 주 광원으로 사용하고, 인공광원으로 빛을 보충해 작물을 생산하는 설비이다. 인공광 식물공장과 달리 외부 환경의 영향을 받기 때문에 더욱 복잡한 환경제어가 필요하다. 이에 빛을 차단하고, 빛을 보충하며 온도를 보존하는 시설을 갖춰야 한다.

1 개요

자연광 식물공장은 태양광이 투과되는 재질로 온실 외부를 덮어 태양광을 주 광원으로 이용, 인공광으로 빛을 보충하여 작물을 생산하는 설비이다. 인공광 식물공장과 다르게 외부 환경 영향을 받기 때문에 더욱 복합적인 환경제어가 필요하다.

인공광원은 고압 나트륨램프나 메탈할라이드램프가 빛을 보충하는 용도(보광용)의 광원으로 사용되고 있다. 이밖에 형광등을 설치하여 다단 재배를 하는 사례도 있다.

자연광 식물공장은 겨울철 난방이 필요하다. 또한 여름철 기온이 높을 때의 대책으로 세무냉방(미세 물방울 기화냉각), 지열 히트펌프 냉방, 에어컨 냉방, 빛을 차단하는 커튼(차광커튼) 등이 필요하다. 주요 재배품목은 상추를 중심으로 한 잎채소류(엽채류)로, 그 외 허브류와 딸기와 같은 열매채소류(과채류)를 생산하기도 한다.

자연광 식물공장은 단위면적당 초기 투자비용이 적고 대규모 공장 건설이 비교적 쉽고 빛을 보충하는 용도(보광용)로 인공조명을 사용하는데 냉방비용을 고려해도 소비 전력은 인공광 식물공장보다 낮다.

자연광 식물공장은 외부에서 들어오는 빛과 열에너지를 이용하여 내부환경을 인위적으로 조절하면서 작물을 재배한다. 자연광 식물공장은 기상조건의 변화에 구애받지 않고 작물을 연중 재배할 수 있는 공간으로 태양광을 효율적으로 이용할 수 있는 구조로 되어 있다.

식물은 주로 태양광을 이용하여 재배하고 기온이 높은 시기에는 빛을 막아 열에너지 부하를 작게 하는 동시에 냉방을 실시한다. 인공광 식물공장보다 외부기상의 영향을 받기 쉽고 공조부하도 크다.

따라서 작물의 연중 생산을 위해서는 냉·난방부하를 줄일 수 있는 빛 차단, 보온, 빛 보충(보광)시설이 필요한데, 빛을 차단하기 위해 적외선차단필름, 산광필름, 이중유리 등을 이용하고 있다.



자연광 식물공장(온실)은 지붕의 모양(형식)에 따라 양지붕형, 벤로형, 아치형 등으로 구분되며, 또한 지붕 개수에 따라 단동과 연동으로 분류한다.

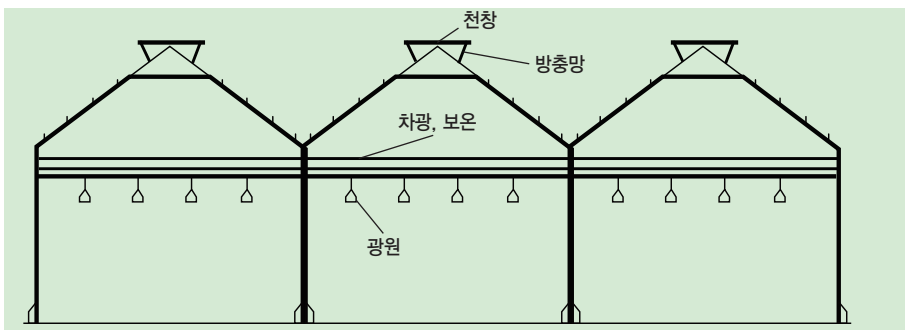
2 종류와 특징

구조

가. 양지붕형

양지붕형은 좌우 양쪽 지붕의 길이가 같은 좌우 대칭인 형태로, 단동형과 연동형이 있다. 단동형은 온실 너비가 넓어지면 상대적으로 온실 높이가 높아지기 때문에 **풍압¹⁾**에 불리하고 단위면적당 건축비도 증가한다.

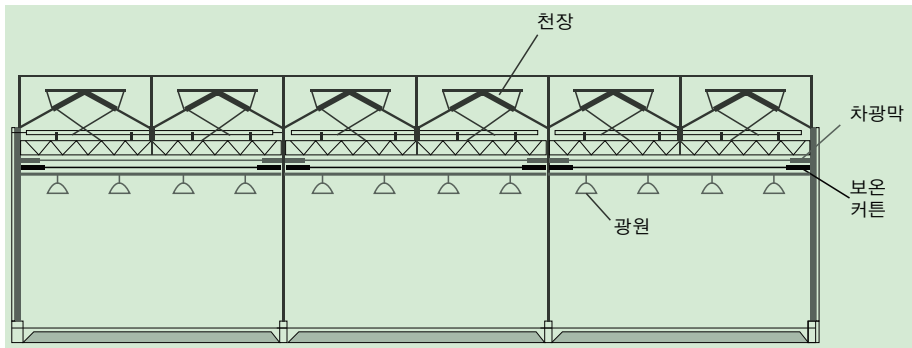
연동형은 온실을 처마 부분에서 연결하여, 높이는 그대로 유지하면서 재배면적을 확장한 형태이다. 연동형은 보온성이 우수하고 시설비를 절약할 수 있다. 그러나 빛 및 온도 분포가 불균일하고 통풍이 불량하며 쌓인 눈의 무게(적설 하중)에 취약하다. 연동형은 길이 방향을 남북으로 설치하는 것이 채광에 유리하다. 내부 커튼시설은 빛 차단(차광) 또는 보온을 목적으로 설치하므로 **기밀성²⁾**을 유지하기 위해 견고하게 설치한다. 강한 바람을 고려하여 천창 개도는 수평까지로 제한한다. 바람의 강도가 세고 눈이 많은 지역에서는 지붕의 취약한 부분을 보강할 수 있는 설비가 필요하다.



〈그림 3-1〉 양지붕형 온실 구조

나. 벤로형

벤로형은 유럽과 네덜란드를 중심으로 발전한 연동식 온실로, 폭이 좁고 처마가 높은 양지붕형을 연결한 형태이다. 온실의 지붕너비가 좁아 지붕 골조재의 길이가 짧고 간격이 넓으며 트러스형의 보 위에 지붕이 설치된다. 벤로형은 서까래 간격이 넓으므로 골조가 적게 들어 시설비가 절약된다. 온실 골격율이 20%인 일반온실에 비해 12%로 낮아 빛이 투과하는 비율(광투과율)이 높다. 지붕면의 너비가 3.2m이고 2개의 지붕 6.4m가 한 동을 이룬 것이 기본형이며, 9.6m, 12.8m폭의 온실도 설치되고 있다.



〈그림 3-2〉 벤로형 구조

한국형 벤로온실은 천창이 오른쪽, 왼쪽으로 열고 닫는 형태(좌우 개폐형)로 네덜란드 벤로형의 지그재그 환기보다 지붕 환기 성능이 높은 것이 특징이다.

Tip.

v1 풍압

바람이 물체에 부딪혔을 때 그 물체의 단위면적에 작용하는 압력

v2 기밀성

밀폐되어 기체가 통하지 않는 성질



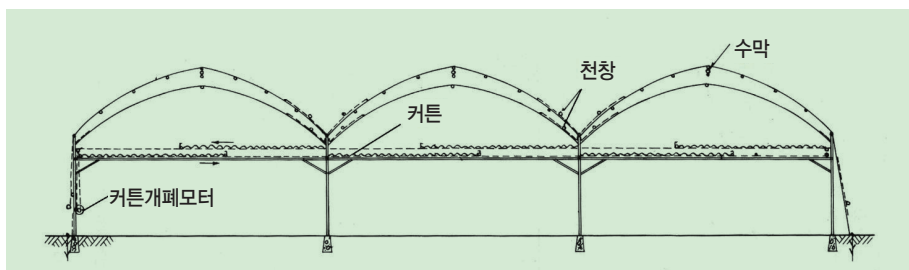
〈표 3-1〉 양지붕형과 벤로형 유리온실 비교

구분	양지붕형 (Widespan Type)	벤로형(Venlo Type)	
		한국형	네덜란드형
외 형			
지붕형태	지붕이 높고, 넓음	지붕이 낮고, 좁음	지붕이 낮고, 좁음
측면 높이	4~5m, 높이기 어려움	4~7m, 높음	4~7m, 높음
골 재	각관 + C형강	각관 + 알루미늄바	각관 + 알루미늄바
환 기 성	천·측창 환기	천창(양면 개폐)	천창(지그재그 개폐)
피 복 재	투명 평판유리	투명 평판유리	천창(지그재그 개폐)
광투과율	90% 이상	90% 이상	90% 이상
안 전 성	쌓인 눈의 깊이(적설심) 40cm	쌓인 눈의 깊이(적설심) 35cm	쌓인 눈의 깊이(적설심) 35cm
재배환경	토양재배, 수경재배	수경재배	수경재배
수 명	20~25년	20~25년	20~25년
농가선호	낮음	높음	높음

다. 아치형

아치형은 플라스틱 온실의 일반적인 형태로, 지붕 모양이 반원이나 곡선이다. 아치형은 내풍성(바람을 견디는 성질)이 강하고 광선이 고르게 들어오며 파손위험이 적다. 최근에는 골조용 파이프 규격이 커지고 구조 안전성을 높인 하우스 모델이 개발되고 있다. 그러나 양지붕형이나 벤로형에 비해 시설 구조가 취약하여 자연재해에 약할 뿐만 아니라 사용되는 자재의 재질이나 내구성도 유리온실보다 떨어진다.

식물공장은 장기간 사용 가능한 생산시설이기 때문에 덮는 자재(피복재)를 선택하고 정밀한 환경조절을 위한 장치 도입이 필요하다.



〈그림 3-3〉 아치형 온실 구조

골조재

온실 골조용 철재 자재는 파이프, 경량형강, 압연강 등이 사용된다. 유리온실에 사용되는 골조재는 I형강, H형강, 4각관 등이 있고, 단단하고 굳은 성질의 덮는 자재(경질 피복재)를 사용하는 온실에서는 C형강도 사용한다. 철재는 강도가 높기 때문에 강한 바람과 쌓인 눈에 강하고 골조율을 감소시킬 수 있으며, 대형 연동 온실에 적합하고 기계 및 장치 사용이 쉽다.

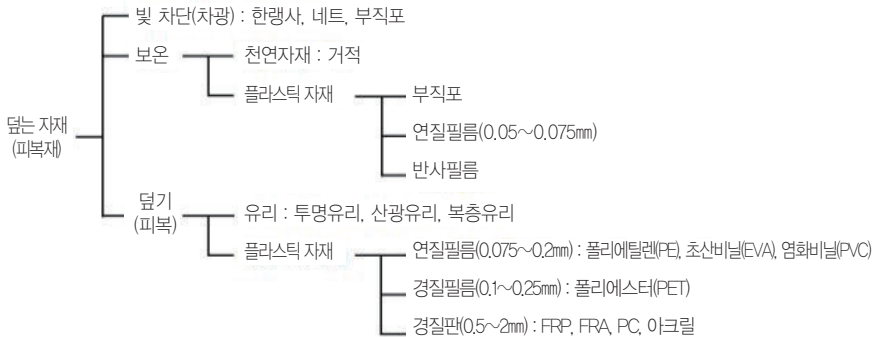
온실 골조의 보조재로 사용되는 알루미늄이나 기타 합금재는 철재보다 가볍고 녹이 슬지 않아 다양한 형태의 자재를 만드는 데 이용된다. 강도는 합금의 종류나 열처리 방법 등에 따라 다르지만, 보통 철재의 1/2 정도이다.

덮는 자재(피복재)

덮는 자재(피복재)는 주간엔 온실 내부로 들어오는 태양복사열에 의해 내부 온도를 상승시키는 역할을 한다. 덮는 자재(피복재)가 갖추어야 할 기본적인 조건은 투광성과 보온성이다. 이 두 조건은 물리적 성질이 상반되기 때문에 투광성과 보온성을 동시에 만족하기 어렵다. 덮는 자재(피복재)는 투광성과 보온성은 물론이고, 무적성[※], 내구성 및 시공성이 우수해야 하며 버리는 방법(폐기 방법)이 쉬워야 한다.

자연광 식물공장에서 지나치게 많은 태양광이 들어오면 시설 내부 냉방부하의 증가 원인이 된다. 따라서 냉방시스템과 함께 온실에 그늘을 형성하는 차광장치를 설치해 유입되는 일사량 일부를 차단해야 한다. 또한 열을 내는 적외선 일부를 차단하고 광

합성에 필요한 가시광선과 자외선은 통과시키는 특성이 있는 열선차단유리로 덮으면 내부 온도를 낮추는데 효과적이다.



〈그림 3-4〉 덮는 자재(피복재)의 분류

덮는 자재(피복재)는 기초 피복재와 추가 피복재로 구분된다. 기초 피복재는 고정시설을 덮어 상태 변화 없이 계속 사용하는 자재이고, 추가 피복재는 기초 피복재 위에 보온, 빛 차단(차광), 반사 등을 목적으로 추가하는 피복자재이다.

가. 유리

유리는 투광성, 내구성, 보온성 등이 우수하나 유리를 지탱하는 골격 자재가 견고해야 하므로 설치비용이 많이 든다. 두께 3~4mm의 판유리가 가장 많이 사용된다.

나. 폴리에틸렌(PE, Polyethylene)

폴리에틸렌필름은 다른 덮는 자재(피복재)보다 가격이 싸기 때문에 가장 많이 사용한다. 이 필름은 광선투과율이 높고, 필름 표면에 먼지가 적게 부착되며 필름끼리 서로 달라붙지 않기 때문에 취급이 편리하다. 또한 다른 연질필름에 비해 자외선과 적외선투과성이 우수하다. 그러나 보온성, 투광성, 내구성과 강도는 염화비닐(PVC)나 초산비닐(EVA)에 비해 떨어진다.



다. 염화비닐(PVC, Polyvinyl Chloride)

염화비닐은 투명도나 강도, 내후성^{v1}, 보온성이 우수하고 피복작업이 비교적 쉽다. 그러나 먼지가 많이 부착되고 필름끼리 잘 달라붙어 취급이 불편하고 가격이 비싸다. 제조과정에서 가소제, 열 안정제, 자외선 흡수제 등을 첨가하여 강도, 내후성, 보온성을 향상시킨다. 물과 친화성이 적어 비닐표면에 물방울이 맺히므로 계면활성제를 첨가하여 필름표면에 물방울이 맺히는 것을 방지한다. 염화비닐필름은 추위에 견디는 성질인 내한성이 약해 낮은 온도 조건에서 덮을 때는 파손에 주의하여 너무 강하게 고정하지 않도록 하고 될 수 있으면 따뜻한 날에 덮는다.

라. 초산비닐(EVA, Ethylene Vinyl Acetate)

초산비닐필름은 보온성과 내구성이 폴리에틸렌(PE)과 염화비닐(PVC)필름의 중간 성질을 가진다. 물방울이 생기지 않는 무적필름이기 때문에 사용 면적이 증가하고 있다. 폴리에틸렌(PE)필름보다 내후성이 좋고 가벼우며 쉽게 더러워지지 않는 장점이 있으나 인열강도^{v2}가 약하고 가격이 다소 비싸다.

마. 폴리에스터(PET, Polyethylene-terephthalate)

폴리에스터 필름은 장파장 투과를 억제하여 보온성이 우수하며, 투광성, 내열성도 우수하고 매우 낮은 온도에서도 사용할 수 있다. 이 필름은 연소시켜도 유독가스가 발생하지 않는다. 자외선을 투과시키는 필름은 4~5년, 투과시키지 않는 필름은 6~8년 정도 사용이 가능하다.

바. 부직포

광투과율이 연질필름보다 낮고 보온력도 떨어지지만, 두께를 두껍게 하면 보온력을 높일 수 있다. 물을 보유하는 성질(보수성)과 수증기가 투과되는 성질(투습성)을 갖고 있어 커튼으로 사용하면 식물공장 내 습도가 높아지는 것을 방지할 수 있으나 습기를

Tip.

v1 내후성

실외의 빛, 비바람, 기온, 건조한 습도 등 자연적 장해를 견디는 성질

v2 인열강도

미리 칼로 찢 자리를 내고 그 종이 뜯는 필름을 계속 찢는데 들어가는 힘의 평균값

흡수하면 보온력이 떨어진다. 수명은 대략 3년 정도이고 규격은 너비 90~300cm, 길이 50~100m로 다양하다.

사. 반사필름

반사필름은 두께에 의한 보온과는 달리 복사열을 반사해 작물의 빛(광)에너지 이용효율을 향상시킨다. 반사필름의 종류에는 알루미늄 혼입필름, 알루미늄 증착필름, 알루미늄 샌드위치필름 등이 있다. 보온력은 혼입필름 > 증착필름 > 샌드위치필름 순이다.

♣ 덮는 자재(피복자재)를 선택할 때 고려할 사항

- 재배 작물을 결정하고, 기후나 재배시기, 작물을 키우는 땅(포장)의 상태 등을 고려하여 작물에 적합한 온실의 모양, 크기, 종류 등을 결정한다.
- 바깥을 덮는 자재(외피복재)는 직접 외기에 노출되므로 사용 가능 햇수(내구연한), 역학적, 광학적 특성, 보온특성, 특히 보수할 때나 버리기 쉽고 어려운 성질(난이성) 등을 비교 검토하고, 안에 덮는 자재(내피복재)는 보온성이나 작업성, 사용 가능 햇수(내구연한) 등을 고려한다. 덮는 자재(피복재)로 요구되는 특성은 다음과 같다.
 - 투광성: 작물이 필요한 만큼의 태양광선을 흡수할 수 있는 투명도와 투명도를 오래 유지해야 한다.
 - 보온성: 야간의 냉각을 방지 및 온도 상승효과가 있어야 한다.
 - 내후성: 강도를 유지하고, 변색 및 착색이 적어야 한다.
 - 무적성: 물방울이 맺히지 않고 흘러내려야 하며 그 효과가 오래 가야 한다.
 - 물리성: 충격과 인장(찢어지지 않는 힘)에 강하고, 팽창과 수축이 적어야 한다.
 - 작업성: 덮는 작업이 쉬우며 필름 간에 접착성이 없고 가벼워야 한다.
 - 경제성: 사용 가능 햇수(사용연한)이 길고 가격이 저렴해야 한다.

3 광원

자연광 식물공장은 태양광을 주 광원으로 하여 작물을 재배하는데, 비가 오거나 흐린 날 등 필요 시에는 고압 나트륨램프나 메탈헬라이드램프 등을 사용하여 빛을 보충한다. 일부 다단 재배 배지에서는 빛 보충(보광용) 광원으로 형광등을 사용하기도 한다. 빛 세기(광강도)는 어느 정도 인위적으로 제어할 수 있으나 인공광 식물공장보다 제어 정밀도는 떨어진다.

광원의 종류와 특성

가. 빛 보충(보광) 광원

자연광 식물공장은 태양광이 주 광원으로 이용되고, 인공광은 빛 보충(보광)을 목적으로 이용된다. 대규모 온실을 이용하는 자연광 식물공장은 재배면적이 넓어서 인공광원 1개당 빛을 쏘이는 범위(조사범위)가 넓어야 하므로 주로 고압 나트륨램프, 메탈헬라이드램프, 백열등 등을 이용한다. 이밖에 특정 파장역을 제어할 수 있는 LED(발광다이오드)도 일부에서 이용하고 있다.

겨울철 온도가 낮은 시기에는 이들 광원을 이용하여 발광효율을 높인다. 램프의 발열로 온실 내 온도를 상승시켜 보온효과를 거두기 위해 사용하기도 한다. 그러나 여름철 온도가 높은 시기에는 빛을 차단하더라도 발열 때문에 냉방부하 증가가 문제가 되기도 한다.

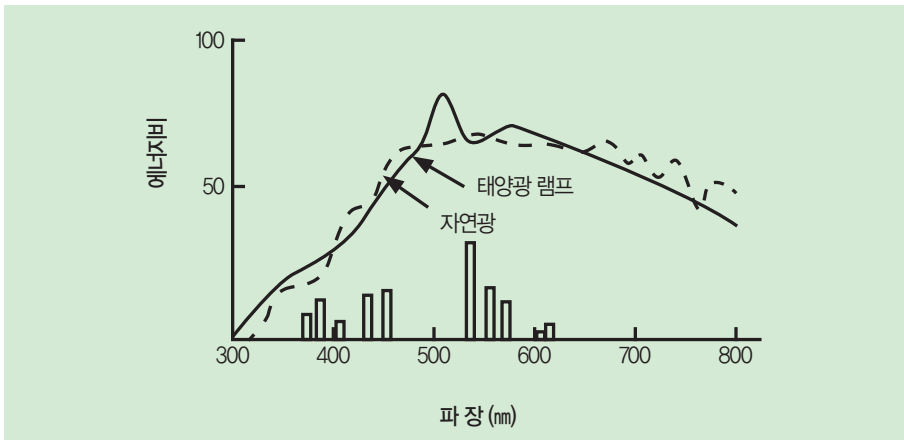
1) 고압 나트륨램프

고압 나트륨램프는 적색광~원적색광 영역이 많고 청색광역은 적다. 이 램프는 자연광

식물공장의 빛 보충(보광용) 광원으로 가장 널리 사용하고, 일부 인공광 식물공장에서도 이용한다. 안정기나 등기구가 크고 무겁기 때문에 광원 설치 시 별도의 지지구조물이 필요하다.

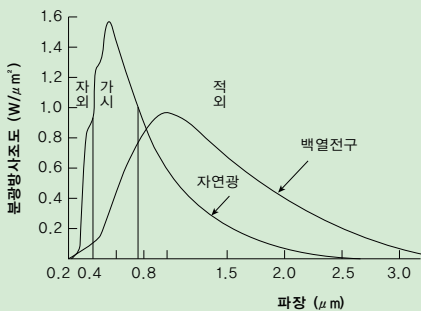
2) 메탈헬라이드램프

메탈헬라이드램프는 발광관 내부에 수은, 아르곤 등의 가스와 메탈헬라이드가 들어 있어서 빛의 효율(광효율)이 좋다. 늦가을~겨울 사이 구름이 많은 날이 지속되는 경우 빛 보충(보광) 광원으로 사용된다.



〈그림 3-5〉 메탈헬라이드램프와 자연광의 방사분포 비교 스펙트럼 (Takatsuji M, 2011년)

3) 백열등



백열등과 자연광의 방사 분포



백열등 빛 보충(광주)의 빛 보충(보광)재배 농가 전경

〈그림 3-6〉 백열등과 자연광의 방사분포 비교



백열등은 빛 세기(광강도)가 높지만, 버리는 전구에 때문에 환경오염 등의 문제가 있어 사용이 금지되는 추세이다. 백열등은 가격이 저렴하여 경제적이지만 발광효율과 광합성효율이 낮고 열이 많이 나며 수명이 짧아 특히 온도가 높은 시기에는 빛 보충(보광용) 광원으로 부적합하다.

4) 형광등

형광등은 주변온도 20~25 ℃ 범위에서 밝기가 최대가 되도록 설계된 광원이다. 자연광 식물공장과 같이 시설 내 온도제어가 어려운 경우에는 부적합하며 인공광 식물공장에 적합한 광원이라고 할 수 있다.

형광등은 백열등과 달리 발열량이 적어 가까이에서 빛을 쏘이는 것(근접조사)이 가능하지만, 조명장치를 천장에 설치하여 위에서 아래로(하향으로) 빛을 쏘이는 경우에는 램프가 차지하는 면적이 넓어 그늘이 만들어지는 단점이 있다.

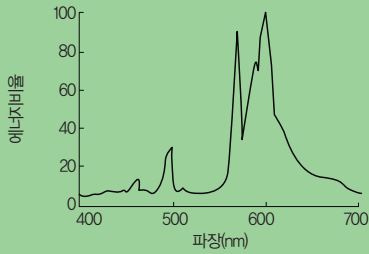
5) LED(Light Emitting Diode, 발광다이오드)

LED는 빛 자체에서 열 발생이 비교적 적기 때문에 가까이에서 빛을 쏘이는 것(근접조사)이 가능하고 빛의 색(광질)을 선택할 수 있다는 점에서 빛 보광 효율을 높일 수 있는 광원으로 빛 보광 재배에서 이용성이 확대되고 있다. LED는 고가이기 때문에 온실과 같은 대규모 시설에 도입하기에는 시간이 소요될 것으로 생각된다.

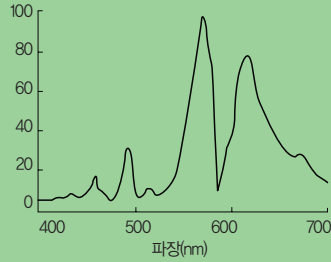
LED는 파장이 다양하기 때문에 빛과 식물과의 관계를 정확하게 파악한 후 사용하여 최적의 빛(광)조건을 만드는 것이 중요하다. 따라서 LED를 빛 보충 광원으로 사용할 때 빛이 퍼지는 기술(광확산 기술)을 이용하여 빛 보충 효과를 높이는 기술이 필요하다.

LED를 광원으로 선택할 때에는 가격이나 기존 시설과의 호환성 등을 고려해야 하지만 수명이 길고 램프의 크기가 작아서 설계와 설치가 쉽다. 그러나 대규모 시설에서는 초기 투자비가 많이 들고 재배작물의 종류나 생장단계에 따라 필요로 하는 빛의 색(광질)이나 빛 세기(광강도)가 달라서 광원을 선택할 때 주의가 필요하다.

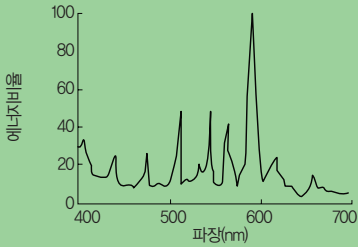
♣ 각 광원별 스펙트럼 분포와 특성



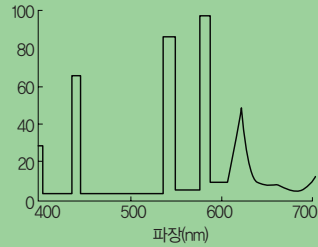
고압 나트륨램프
(효율 : 140~150lm/W, 수명 : 1만 2,000시간)



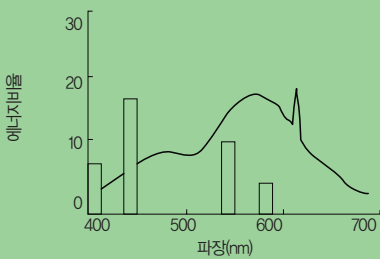
황색 고압 나트륨램프
(효율 : 106lm/W, 수명 : 1만 2,000시간)



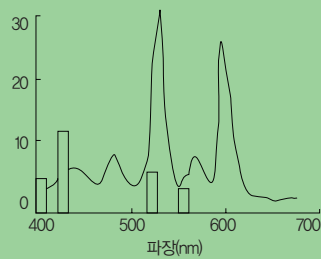
메탈할라이드램프
(효율 : 110lm/W, 수명 : 6,000시간)



수은램프
(효율 : 57lm/W, 수명 : 1만 2,000시간)



주광색 형광등
(효율 : 85lm/W, 수명 : 1만 2,000시간)



고황색 형광등
(효율 : 92lm/W, 수명 : 1만 2,000시간)

(Takatsui M, 1993년)



나. 전등조명(전조) 및 빛 보충(보광)

자연광 식물공장은 낮 동안 태양광을 이용하여 식물을 재배한다. 전조는 일장(日長) 시간을 인위적으로 연장하거나 야간에 한때 빛을 비춰 화훼작물의 꽃눈 분화를 억제하거나 휴면타파^{v1} 효과를 얻기 위해 인공광을 쏘여 재배하는 것이다. 빛 보충(보광)은 일출 및 일몰 이외에 구름, 비(강우) 등에 의해 태양광이 충분하게 들어오지 않는 시기에 인공광원을 이용하여 빛을 보충하는 것이다.

자연광 식물공장은 인공광을 이용하여 국화를 전등조명(전조) 재배하거나 난과 식물을 빛 보충(보광) 재배한다. 네덜란드 등 북유럽은 채소류가 아닌 화훼류 생산을 위주로 한 빛 보충(보광) 재배가 활발하다.

자연광 식물공장은 인공광 식물공장에 비해 설치비용이 저렴하지만, 인공광원의 이용 효율이 낮기 때문에 비(강우), 황사 등 태양광 입사가 곤란한 경우에는 완전한 빛(광)환경 제어가 불가능하여 식물공장 안 작물의 성장반응 제어가 곤란한 경우가 많다.

가을국화는 단일성 화훼작물로, 단일처리하면 꽃 피움이 촉진되고 장일처리하면 개화가 억제된다. 8~9월에 개화하는 가을국화에 전등조명(전조) 재배를 하면 12~1월로 꽃이 피는 시기(개화시기)를 늦출 수 있다.

딸기의 전조재배는 일몰 직후나 일출 전부터 야간에 3~4시간씩 빛을 비춰 일장시간을 이 13.5~14시간 연장하거나 야간에 시간당 10여분씩 조명을 하거나 밤 23시부터 2~3시간 동안 조명하면 휴면타파를 용이하게 하거나 과일수량을 높일 수 있다.

인공광의 강도는 대상작물이나 재배목적에 따라 다르기 때문에 최적의 빛(광)조건이 설정되지 않으면 빛 보충(보광) 재배 효과를 기대할 수 없다. 일반적으로 식물 성장을 촉진하는 빛 세기(광강도)를 설정하기보다는 식물이 갖는 기능성 성분을 증가시키기 위한 빛 세기(광강도)나 빛의 색(광질)을 확보하는 측면에서 빛 세기(광강도) 설정에 주의를 기울이는 것이 바람직하다. 자연광 식물공장에서 빛 보충(보광) 기술을 도입하고자 하는 사례가 늘고 있지만 빛 보충(보광) 재배가 실용화되기 위해서는 경제성 문제를 고려해야 한다.

Tip.

v1 휴면타파

식물의 싹트기와 성장 등이 일시적으로 정지해 있는 상태인 휴면상태를 없애 다시 성장하게 하는 작업

♣ 자연광 식물공장 내 인공광 이용 빛 보충(보광) 시 유의할 사항

○ 인공광과 병행하는 장점을 명확히 한다.

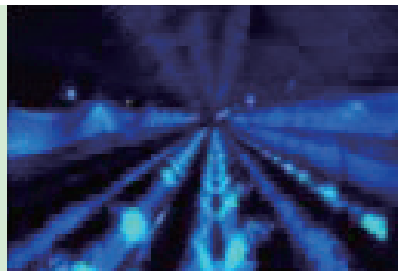
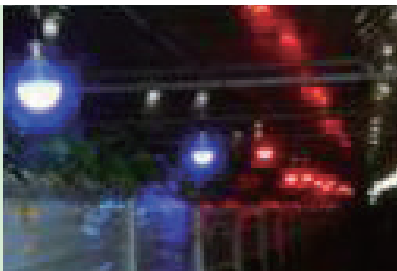
왜 인공광을 도입해야 하는지를 명확하게 할 필요가 있다. 농가에서의 빛(광) 설치에는 많은 비용이 소요되기 때문에 인공광 설치 전에 세밀한 검토가 필요하다. 빛(광)을 보충하는 장점이 무엇인지, 판매가격을 올릴 수 있는지 등 수요자의 요구에 부응할 수 있는지에 대한 고려가 필요하다.

○ 인공광을 병행하는 목적을 명확히 한다.

인공광에 의해 생육촉진을 목적으로 하는지, 기능성 성분을 증가시키기 위한 것인지, 일장이나 꽃눈 형성(화아 형성)을 제어하기 위한 것인지 등 인공광을 겸용하는 목적을 명확히 할 필요가 있다. 어떤 빛(광)이라도 보충을 하면 식물 성장과 성분이 증가할 것이라고 생각하는 것은 위험하다. 식물에 따라서는 약한 빛(약광)에서 생장이 촉진되는 것도 있고 약한 빛(약광)에서 웃자라는 경우(도장)도 있다. 빛 강도(광강도)뿐만 아니라 빛의 색(광질)에 의해서도 생장촉진과 억제현상이 발생하므로 적합한 파장의 빛(광)을 적정 광강도로 몇 시간 쏘아주는 것이냐는 식물과 목적에 따라 달라진다.

○ 소규모 시험재배를 한다.

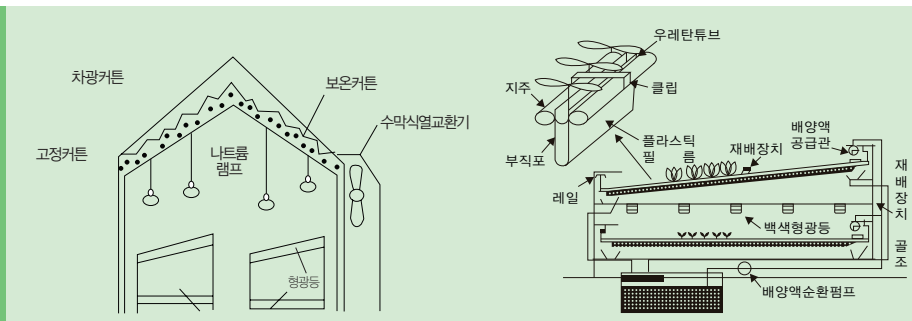
인공광원의 도입이나 설치 전에는 소규모 재배시험을 실시한다. 빛 보충의 조건은 지역이나 사용온실에 따라서 다르기 때문에 사용광원을 임대하거나 샘플을 구해 초기 단계에 시험해 본다.



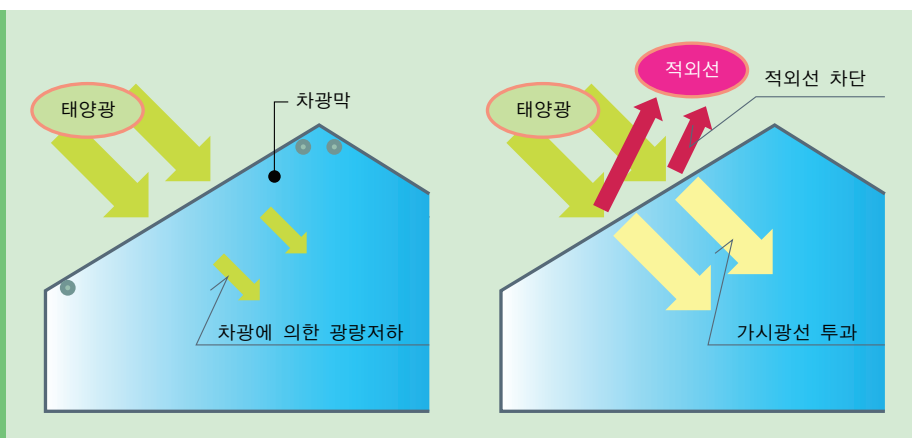
〈그림 3-7〉 인공광을 이용한 빛 보충(보광) 재배(일본 Maeda 농장)

자연광 식물공장 사례

전력중앙연구소(일본)는 3.1m 크기의 재배장치로 구성된 식물공장을 운영하고 있다. 재배장치 아랫단에는 낮은 빛 강도(광강도)에서 생육 가능한 싹틔우기(최아)나 모종 기르기(육묘) 작업을 하고, 윗단에는 시금치 등의 작물을 2단 재배한다. 윗단에는 자연광이 들어오는 양이 적을 경우를 대비해 400W의 반사형 고압 나트륨램프를 설치해 자동으로 빛 보충(보광)을 제어한다. 아랫단은 윗단의 재배작물 사이로 투과되는 빛에 더해 110W의 형광등을 설치, 빛을 보충해 전력비용을 절감한다.



〈그림 3-8〉 전력중앙연구소 식물공장 재배실 및 2단 재배 시스템 단면도



〈그림 3-9〉 냉방부하 저감을 위한 적외선 차단

시코쿠전력(일본) 식물공장은 자연광을 이용한 빛 보충(보광)형 재배시스템으로, 여름철 높은 온도에 따른 환경제어를 쉽게 하기 위해 측면 높이(측고) 3.7m의 벤로형 구조를 채택했다. 천장면의 유리는 적외선 차단필터가 포함된 재료를 사용하고 있다. 적외선 차단필터는 380~780nm 가시광은 투과하지만, 적외선은 거의 투과시키지 않기 때문에 여름철 온도가 높을 때에도 재배실 안 온도의 상승을 억제하는 효과가 있다. 일조시간이 짧은 겨울철에는 아침과 저녁에 각각 8,000lx로 빛을 보충(보광)하고, 인공광 재배실에서는 고압 나트륨램프를 사용하여 벤치 위 1.4m 높이에서 약 20klx의 빛을 쏘인다.

4 냉·난방

난방

자연광 식물공장은 단열성이 낮은 유리나 투명의 덮는 자재(피복재)를 사용하기 때문에 겨울철에는 난방이 필요하다. 난방에는 온풍 난방기와 온수 보일러를 이용한다. 온풍 난방은 온풍 난방기의 송풍기에서 배출되는 40~70℃의 공기를 강제 순환시켜 난방하는 방식으로, 실내의 공기유동속도가 빠르고 예열시간이 짧다. 그러나 공기가 건조해지기 쉬우며 온실 벽체로부터 외부로 손실되는 대류 열손실이 많다. 야간에는 난방비를 절감하기 위해 개폐식 보온커튼을 사용한다.

산업용 보일러를 이용한 온수 난방은 온수 보일러에서 배출되는 40~90℃의 온수를 온실 내에 설치된 열교환기로 보내 실내공기와의 자연대류로 난방한다. 공기유동속도가 느려 온실 벽체를 통한 대류 열손실이 적고 실내에 균등한 난방이 가능하지만, 철재관이나 에어로핀관, 알루미늄 방열관 등의 열교환기 시설에 비용이 많이 든다.

최근에는 수열원(물의 열원)이나 지열(땅속열원)을 이용하여 투입되는 에너지보다 훨씬 더 많은 에너지를 공급하는 히트펌프가 도입되고 있다.



파이프 방열관



에어로핀관



알루미늄 방열관

〈그림 3-10〉 온수보일러 방열관

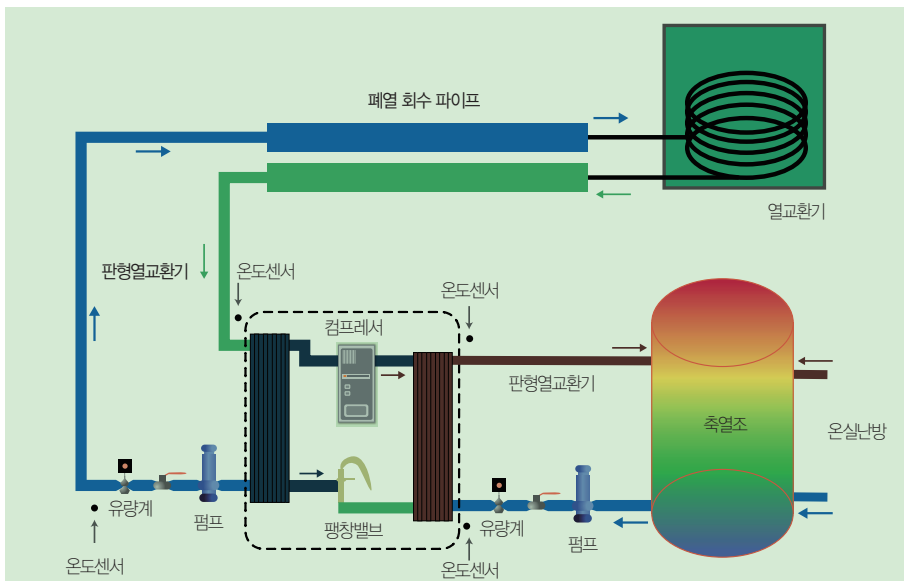
가. 지열 히트펌프 난방시스템

지열 히트펌프는 지하에 지중열교환기를 매설하여 땅속열을 히트펌프의 열원으로 이용하는 것이다. 축열식 수평형 지열 히트펌프는 지열교환기, 축열조, 히트펌프, 실내 열교환기 등으로 구성된다.

축열식 수평형 지열 히트펌프는 지하 3m 내외의 땅속에 폴리에틸렌(PE) 파이프를 깔고 물을 순환시켜 땅속열을 흡수, 히트펌프의 열원으로 사용한다. 겨울철에는 5~15℃의 지중열을 흡수하고 히트펌프를 이용 40~50℃로 높여 난방을 한다. 여름철에는 시설 내부의 열을 흡수하여 지중으로 방출해 온실을 냉방하는 원리이다. 공기열원 히트펌프는 영하의 공기(대기) 중에서 열을 흡수하므로 겨울철 바깥 기온이 낮은 경우에는 공기열원식 히트펌프 사용이 어렵다.

나. 축열식 수평형 지열 히트펌프 시스템 적용사례

경남 진주시 사봉면에 있는 현장 실증농가에서는 조직배양 모종(묘)을 재배하고 있다.



〈그림 3-11〉 지열 히트펌프 난방



온실의 관리온도는 22℃, 온실면적은 1,000㎡, 3동의 온실에 축열식 수평형 지열 히트펌프시스템, 수직형 지열히트펌프시스템, 경유 난방기를 각각 설치하고 난방비용을 비교 분석했다.

2007년 12월 20일부터 2008년 3월 22일까지 약 3개월간 각각의 온실에서 실내온도를 22℃로 유지했다. 진주지역 최저 바깥 기온과 시험용 온실의 보온상태, 재배 작물의 관리온도 등을 고려하여 최대 난방부하를 산정했다. 이를 기준으로 설계된 축열식 수평형 지열 히트펌프의 용량은 25RT(80,000kcal/h)로, 축열조(가로 2.0m × 세로 2.0m × 높이 2.5m) 용량은 겨울철 평균 일의 온실 내 잉여태양에너지를 축열 하여 사용한다는 가정 하에 200만kcal로 설계하였고, 축열조의 규모는 10톤이었다.

지열교환기용 폴리에틸렌(PE) 파이프는 내경 28mm, 외경 34mm, 직경 1.0m의 슬링키(Slinky) 형태로 제작했으며, 총 길이는 6,000m였다. 수직형 지열 히트펌프시스템은 수직개방형으로, 히트펌프의 용량은 수평형과 같은 25RT로 설계했다.

수직개방형 지열 히트펌프의 설치비용은 9,000만 원, 축열식 수평형 지열 히트펌프의 설치비용은 4,500만 원이었다. 경유 난방기를 설치한 온실에서 같은 기간 동안 사용된 경유소비량은 1만 769L이었으며 당시 면세유 평균가격 820원/L로 산정하면 총 난방비용은 883만 580원이었다. 소비전력은 농업용(병)전기를 기준으로 수직개방형 4만 4,679kW, 수평형 4만 8,824kW로 나타났다.

초기 투자비용(설치비용)을 고려할 때 수직개방형 지열 히트펌프시스템의 초기 투자비용 회수기간은 12.8년(9,000만원/절감액), 축열식 수평형 지열 히트펌프시스템은 6.5년(4,500만원/절감액)으로 분석되었다. 온실의 난방비 절감액은 최대 1,270만 8,646원(687만 7,620원/92일 × 170일)으로, 초기 투자비용 회수기간은 4년 이내로 단축가능하다는 결과를 얻었다.



〈표 3-2〉 지열 히트펌프시스템의 난방비 절감효과 분석

구 분	경유 난방	수직형 지열	수평형 지열
경유소비량(L)	10,769	—	—
전력소비량(kW)	—	44,697	48,824
난방비용(원)	883만 580원	178만 7,880	195만 2,960
절감액(원)	—	704만 2,700	687만 7,620
지수	100	20	22

※ 전력요금 : 40원/kWh(농업용 병, 부가세 포함)

※ 경유가격 : 820원/L

※ 경유소비량(경유 난방온실) : 1만 769L

냉방

여름철 시설 내부의 온도상승을 억제하기 위해서는 기계적 냉각방식과 수분증발을 이용한 증발냉각 방식을 이용한다. 에어컨과 같은 기계적인 냉각방식은 초기 설치비가 저렴하나 이후 시설이나 유지관리의 비용 면에서 경제적 부담이 크다. 수분증발 냉각방식은 물이 증발하면서 열을 빼앗는 기화냉각 원리를 이용한 방식으로, 설치비용 및 유지관리비가 비교적 저렴하고 효과도 우수한 편이다.

자연광 식물공장은 지나치게 많은 일사유입으로 식물공장 내부의 냉방부하가 증가한다. 따라서 냉방시스템과 함께 온실에 그늘을 형성하는 차광장치를 이용하여 유입되는 일사량의 일부를 차단한다. 또는 열을 내는 적외선 일부를 차단하고 광합성에 필요한 가시광선과 자외선은 차광시키지 않는 열선유리로 덮으면 온도를 낮추는 데 효과적이다.

가. 증발냉각(Evaporative Cooling)을 이용한 냉방

증발냉각이란 비포화 상태의 공기가 물과 접촉하면 물을 증발시키는 데 필요한 잠열량만큼 공기로부터 열을 빼앗아 가는 원리를 이용한 냉각 방식이다. 증발냉각 방식은 유입공기의 건구온도를 습구온도 부근까지 낮추기 때문에 건구온도와 습구온도의 차이가 클수록 효과가 크다.



증발냉각 방식은 기온은 내려가지만 물이 증발하기 때문에 상대습도가 상승하고 가습상태를 방치하면 다시 온도가 상승해 환기와 습기 제거가 필요하다. 실내 상대습도가 높은 상태에서는 냉각효과가 작을 뿐만 아니라 지나치게 습해지기 쉽다. 따라서 일사량이 많고 상대습도가 높지 않은 온실에 효과적이다.

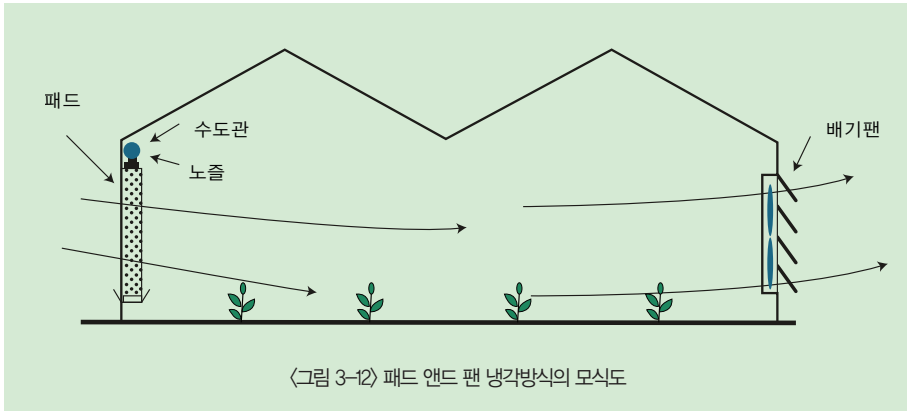
증발냉각 방식에는 패드 앤드 팬 방식과 세무냉방(미세 물방울 기화냉각) 방식이 가장 많이 쓰인다.

♣ 습구온도

- 습구온도계는 온도계의 구부(온도계 액체가 들어있는 온도계 밑 부분)를 명주 헝겊이나 거즈로 감싸 놓고 항상 젖어 있도록 하면 물이 증발하여 구부 주위의 공기가 포화 상태가 되어 물이 증발한 만큼 온도가 낮아지게 되고 이때의 온도를 습구온도라 한다.
- 증발은 습기가 많을 때보다 건조한 날 더 활발히 일어나며 활발할수록 열을 많이 흡수하기 때문에 습구온도는 낮아진다. 이 차이를 이용하여 현재 공기의 습한 정도를 나타내며, 습구온도는 보통 포화수증기압, 상대습도, 볼레지수 등을 나타낼 때에 주로 사용한다.

1) 패드 앤드 팬(Pad and Fan) 방식

패드 앤드 팬 방식은 냉각패드(Cooling Pad) 방식이라고도 한다. 온실의 외벽 부분에 패드를 설치하고 패드 사이로 물을 흘려보낸다. 반대쪽 벽에 설치된 배기팬을 작동시키면 외부 공기가 패드를 통해 들어온다. 이때 공기와 같이 유입된 작은 물 입자가 실내에서 증발되면서 실내 기온을 내린다. 이 냉방장치는 물 소비량이 적고 내구성이 길며, 배기팬을 구동시키는 데에만 전력이 필요하므로 전력소모량이 적다. 그러나 배기팬과 패드의 설치비용이 많이 들기 때문에 대형 온실이나 비교적 부가가치가 높은 모종 기르기(육묘), 화훼류 재배시설에 쓰인다. 고정설치된 패드 때문에 겨울철에 광투과율이 좋지 않으며 온실 내 온도분포가 균일하지 않은 단점이 있다.



〈그림 3-13〉 패드



〈그림 3-14〉 배기팬

2) 세무(細霧)냉방(Fog and Fan 또는 Mist and Fan) 방식

세무냉방(미세 물방울 기화냉각) 방식은 패드 앤드 팬의 패드 대신 흡기구 부분에 설치된 노즐로부터 $50\mu\text{m}(0.05\text{mm})$ 이하의 가는 물방울 입자를 실내에 뿌려 순간적으로 기화한 공기를 배기팬으로 배기시켜 냉각하는 방식이다. 동력분무기를 사용하여 보통 $7\sim 15\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도의 수압으로 노즐에서 가는 물방울을 분사한다. 노즐 1개당 분무량은 $50\sim 150\text{ml}/\text{min}$ 정도이지만, 물방울 입자가 가는 것이 기화하기 쉬우므로 작은 입자로 분사시키는 것이 중요하다.

이밖에 배기팬을 이용하지 않는 자연환기에 의한 세무냉방 방식이 있다. 이 방식은 환기창을 전부 개방한 상태로 온실 상부 전체에 일정 간격으로 설치한 세무 노즐로부터



〈그림 3-15〉세무냉방(미세 물방울 기화냉각) 방식

수분 간격으로 1분 전후의 가는 물방울 분무를 단속적(끊어졌다, 이어졌다 하는 것)로 실시한다. 식물체가 젖기도 하지만 실내의 습구온도까지 내릴 수 있다.

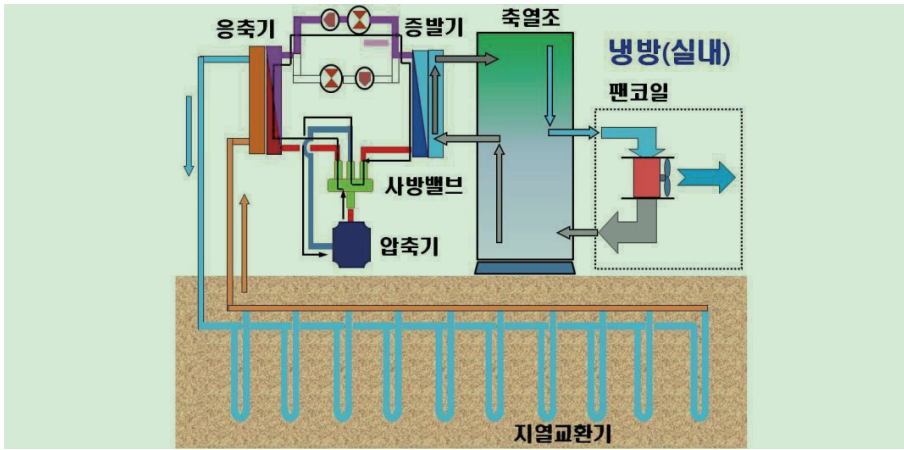
나. 냉수 냉방

공기와 냉수를 직접 접촉하게 시켜 공기를 냉각하는 방식이다. 냉수는 보통 지하수를 사용한다. 파이프에 뚫린 여러 개의 구멍으로 냉수를 분출시키고, 그 사이로 공기를 흘려보내면 낮은 온도의 냉수와 높은 온도의 공기 사이에 열교환이 이루어진다. 이 방식은 작물 부근에 냉풍을 보내기 위한 국소 냉방이나 냉방부하가 작은 야간냉방에 적합하다.

다. 지열 히트펌프에 의한 냉방

지열 히트펌프시스템은 지열교환기, 지열순환펌프, 히트펌프, 실내 순환펌프, 덕트 및 팬 코일 유닛 등으로 구성된다. 지열 히트펌프에 의한 냉방은 실내에서 발생한 열을 히트펌프가 흡수하여 땅속의 지열교환기를 통해 땅으로 열을 방출한다. 냉방원리는 증발기에서 실내공기를 직접 낮추거나 열교환기에서 열교환에 의해 차가워진 물이 팬 코일 유닛을 거쳐 순환하면서 실내공기를 낮추는 것이다.

지열 히트펌프는 지하에 지중열교환기를 매설하여 땅속열을 히트펌프의 열원으로 이용하는 것으로, 시설 내부에서 흡수한 열을 땅속으로 방출시킨다.



〈그림 3-16〉 지열 히트펌프 냉방

5 자동화

대규모 자연광 식물공장은 작물의 공장적 생산을 위한 자동화 기계장치의 도입이 필요하다. 식물공장 규모와 작업여건, 경제성을 고려하여 도입할 자동화 기계 수준과 정도를 검토해야 한다.

모종 기르기(육묘)

가. 모판흙(상토) 소독

모판흙(상토) 소독법은 열처리방법과 화학적방법이 있다. 열처리에는 고압증기멸균기(Auto Clave)가 이용된다. 고압증기멸균기는 높은 압력(1kgf/cm² 이상)과 높은 온도(110~135℃ 이상)의 수증기(스팀)로 모판흙(상토)을 소독하는 장치이다. 일반적으로 121℃에서 15분간 멸균하면 거의 모든 미생물이 죽는다.

싸이론에 의한 모판흙(상토) 소독은 효과가 탁월하지만 사용방법이 까다롭고 소독 후 약제에 의한 피해(약해)가 우려되므로 꼭 필요한 경우가 아니면 피한다.

 <표 3-3> 모판흙(상토) 소독법의 장단점

소독방법	장점	단점
화학적 소독법	- 균을 죽이는 효과 (사멸 효과) 우수 - 모든 생물체가 죽음	- 인체와 식물에 유독 - 처리 후 긴 통기시간 - 천적과 길항균(병원균의 증식을 억제할 수 있는 미생물) 등도 죽음
열처리 소독법	- 소독비용이 저렴 - 인체에 무해 - 짧은 처리시간과 우수한 효과 - 처리 후 즉시 사용 가능	- 일부 병원성 미생물 생존 - 가용성염 증가 (인(P), 칼륨(K), 망간(Mn), 아연(Zn), 구리(Cu), 붕소(B) 등)

나. 상토충전기

모판흙(상토) 충전은 모종을 기르는 트레이에 모판흙(상토)을 자동으로 채우는 것으로, 사람이 직접 하거나 상토충전기를 이용한다. 상토충전기는 공정육묘장, 대규모 분화생산 농가 등에서 많이 이용하고 있다.

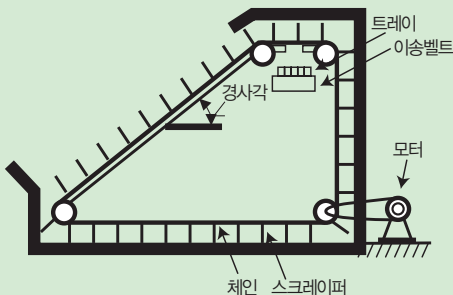
상토충전기를 선택할 때 고려할 사항은 첫째, 사용하는 모판흙(상토)의 물리성에 대한 적응력이다. 둘째, 적당한 흙다짐 정도(적정 경도), 습도, 이물질 포함 정도 등 충전 균일성이 있어야 한다. 셋째, 모판흙(상토) 호퍼(저장탱크)의 용량과 모판흙(상토)의 공급 방식과 넷째, 작업 성능을 고려해야 한다. 다섯째, 플러그 트레이 전용, 또는 다목적용 등의 용도 그리고 여섯째, 기기의 사용 가능 햇수(내구연한) 등을 고려해야 한다.

상토충전기를 이용하여 모판흙(상토)을 충전하는 경우, 모판흙(상토)은 눌러 담지 말고 걷어내는 정도로 다지는 것이 좋다. 상토충전기의 적정 이송속도는 최대이송속도의 50~60% 수준으로 맞추는 것이 좋다.



〈표 3-4〉 플러그 트레이의 구멍 수와 형태별 모판흙(상토) 소요량

트레이 규격	구당 부피(cm³)	트레이당 부피(ℓ)	50L 1포대로 담을 수 있는 트레이수
200 원형	9.0	1.8	27
200 사각	11.0	2.2	22
128 사각	25	3.2	15
72 원형	30	2.2	22



〈그림 3-17〉 상토충전기



다. 파종기

씨뿌리는 파종기의 종류는 자동화 정도에 따라 수동 파종기, 반자동 파종기, 자동 파종기, 일관 자동화된 파종시스템으로 구분된다. 파종기 구조에 따라 ① 종자를 노즐 틈에 흡착하여 파종하는 방식 ② 종자를 드럼에 흡착하여 파종하는 방식 ③ 구멍이 뚫린 2장의 판을 겹쳐 슬라이딩시켜 파종하는 방식 등으로 구분할 수 있다.

파종기는 씨앗의 크기, 모양, 처리량, 작업여건, 경제성 및 식물공장 규모 등을 고려하여 선택한다.

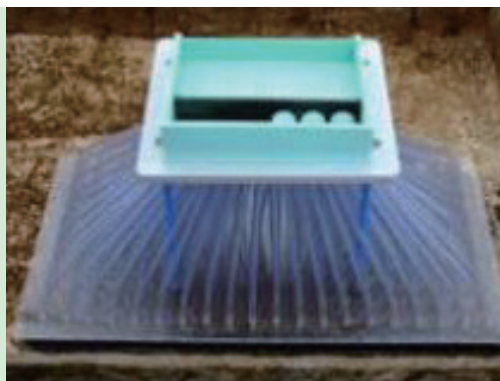
1) 수동 파종기

수동 파종기는 배추, 양배추, 고추 씨앗 등 비교적 둥근 씨앗을 뿌릴 때 적합하다. 수동 파종기는 씨앗통(종자통), 왕복식 배종판, 스프링 등으로 구성된다. 수동 파종기를 이용한 파종작업은 다음과 같다.

첫째, 모종 기르는 트레이(육묘트레이)에 파종기를 올려놓거나 파종대에 육묘트레이를 두고 씨앗통(종자통)에 씨앗을 넣는다.

둘째, 다음 씨앗통(종자통)을 흔들어 주거나 씨앗을 한쪽으로 쓸어 놓은 후 씨앗을 배출하는 셔터(배종 셔터)를 열고 씨앗을 떨어뜨린다.

셋째, 떨어진 씨앗은 씨앗(종자) 유도관을 따라 모종 기르는 트레이(육묘트레이)로 떨어진다.



〈그림 3-18〉 수동 파종기

넷째, 씨뿌리기(파종)가 끝나면 파종대에 트레이를 교체하여 씨를 뿌리거나 파종기를 트레이 위로 옮기면서 작업을 반복한다.

2) 반자동 파종기

반자동 파종기는 진공으로 씨앗을 흡착하여 배출하는 방식의 파종기이다. 반자동 파종기는 진공펌프와 배관장치로 구성되어 있고, 씨앗을 1알(립)씩 바늘 끝에 붙여 트레이 셀에 일치시키도록 이동한 후 진공을 제거하여 셀 안의 씨앗을 떨어뜨리는 구조이다. 작업은 손잡이를 이용해 노즐을 옮겨 씨앗받이(종자받이) 안에 있는 씨앗을 노즐 끝에 흡착한 후 트레이 한열의 상부에서 종자를 떨어뜨려 씨를 뿌린다.

또 다른 형태는 트레이와 같은 수의 노즐이 부착된 파종판으로 씨앗을 한 번에 흡착해 뿌리는 방식이다. 작업은 씨앗상자 안에 있는 씨앗을 진공으로 붙인 파종판을 트레이로 옮겨 씨를 뿌린다.

반자동 파종기는 진공을 이용하기 때문에 씨앗의 모양과 관계없이 간편하게 씨를 뿌릴 수 있다.

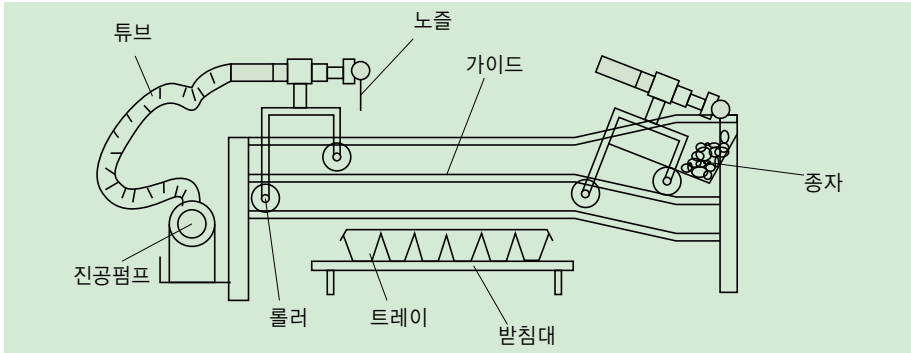
씨뿌리기(파종) 작업은 모판흡(상토) 충전, 씨앗을 심을 구멍 뚫기(혈공), 씨뿌리기(파종), 흙덮기(복토) 등의 과정을 거치는데, 이 공정을 반자동 상토충전기, 반자동 파종기 등을 이용하여 부분 자동화해 작업의 편의성을 높일 수 있다. 반자동 파종기를 이용하여 씨를 뿌릴 때 뿌리기 유의할 사항은 다음과 같다.

첫째, 바닥이 평평한 장소에 수평이 되도록 하고 진동이 없도록 고정한다.

둘째, 압력이 너무 높으면 뿌리는 씨앗의 낱알 수(파종입수)가 많아지고, 압력이 낮으면 부착되지 않는 씨앗(결파)이 많아지므로 진공압을 알맞게 조절한다(씨앗의 흡인 상태 확인).

셋째, 씨앗에 이물질이 섞이지 않도록 유의하고 이물질이 섞이면 골라내(정선) 이물질을 제거한다.

넷째, 씨앗은 연속적으로 공급량과 배출량이 비슷하게 유지되도록 한다.



〈그림 3-19〉 반자동 파종기



〈그림 3-20〉 씨뿌리기(파종) 작업

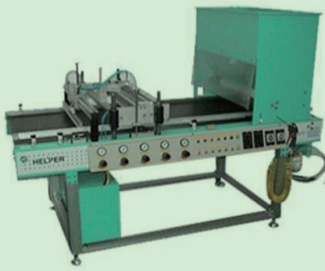
3) 자동 파종기

자동 파종기는 진공 흡인 노즐식으로, 일반 씨앗과 코팅한 씨앗 모두를 사용할 수 있다. 자동 파종기는 단독으로 사용하기도 한다. 공정육묘장 등에서는 파종기 앞뒤로 모판흡(상토) 혼합 및 충전, 씨앗 심을 구멍 뚫기(혈공), 흙덮기(복토), 물주기(관수) 장치 등을 부착 또는 연결해 모판흡(상토) 충전부터 씨뿌리기(파종), 물주기(관수)까지 한꺼번에 처리하는 일관 파종시스템을 사용하고 있다.

자동 파종기는 트레이 공급기 또는 노동력에 의해 투입된 모종 기르는 트레이(육묘트레이)가 컨베이어 벨트에 의해 이송되면서 씨앗을 자동으로 뿌린다. 자동 파종기는 컨

베이어 벨트 속도를 조절하여 씨뿌리는 속도를 조정할 수 있으며, 파종 노즐대, 가이드를 교체하여 128구, 162구, 200구 등 다양한 규격의 트레이에도 씨를 뿌릴 수 있다. 자동 파종기는 작업 전에 주요 부분의 압력설정이 중요하다. 압력이 너무 세면 씨앗이 2개 이상 붙게 되고 약하면 부착되지 않는 씨앗이 많아진다. 씨앗이 들어있는 씨앗통(종자통)의 진동이 약하면 씨앗이 낮게 튀고, 진동이 세면 씨앗이 높게 튀기 때문에 공기압을 적절하게 조절해야 한다.

씨뿌리기에 성공한 비율(파종률)에 영향을 미치는 주요한 요인은 노즐의 진공압력, 씨앗통(종자통) 진동 세기, 배출압력이다. 씨앗의 부착률(종자부착률)은 진공압력에 크게 좌우되므로 적절한 압력의 설정이 중요하다.



〈그림 3-21〉 자동 파종기



〈그림 3-22〉 파종시스템

우레탄 스펀지 배지용 파종기는 수경재배용 스펀지에 작은 씨앗(소립종자)을 뿌리는 장치이다. 우레탄 스펀지에 만들어진 자형 씨뿌리기 홈을 벌린 후 씨앗을 떨어뜨려 심는다. 우레탄 스펀지 배지를 이용하여 모종을 기르는 경우에는 본잎이 3~4장 정도 나왔을 때 아주심는 것(정식)이 좋다. 육묘 시에는 원시표준액 또는 야마자키 상추 배양액의 표준농도 1/2 농도로 관리하는 것이 좋다.

자동 파종기를 사용할 때 유의사항은 다음과 같다.

첫째, 압축공기에 포함된 수분 등이 씨뿌리기(파종) 장치부품에 공급될 때 파종기 고장이나 성능이 저하될 수 있으므로 유·수분 제거장치를 설치한다.

둘째, 파종기의 각 장치에 공급되는 공기압력은 파종 성능에 영향을 미치므로 각 장



치로 가해지는 공기 압력을 적정하게 조절한다.

셋째, 씨앗통(종자통)의 진동 세기도 파종 성능에 영향을 미치므로 적정한 진동이 되도록 조절한다.

넷째, 씨를 뿌릴 때(파종) 이물질에 의해 노즐이 막히는 일이 없도록 씨뿌리기 전에 씨앗에 섞여 있는 이물질을 제거한다.

라. 싹틔우기(발아) 및 모종 기르기(육묘) 장치

싹틔우기(발아) 및 모종 기르기(육묘) 장치는 외부 온도와 관계없이 안정된 싹틔우기와 모종 기르기를 돕는 장치이다. 모종 기르기(육묘)는 모종 기르기 방(육묘실)에서 이루어지는데, 모종을 기른 후 재배상으로 옮기는 방식과 재배실에서 싹틔우기와 모종 기르기를 같이 하는 방식이 있다. 자연광 식물공장은 외부 기상에 따라 내부 환경의 변화가 크기 때문에 별도의 싹틔우기(발아) 및 모종 기르기(육묘) 시설을 갖추는 것이 좋다.

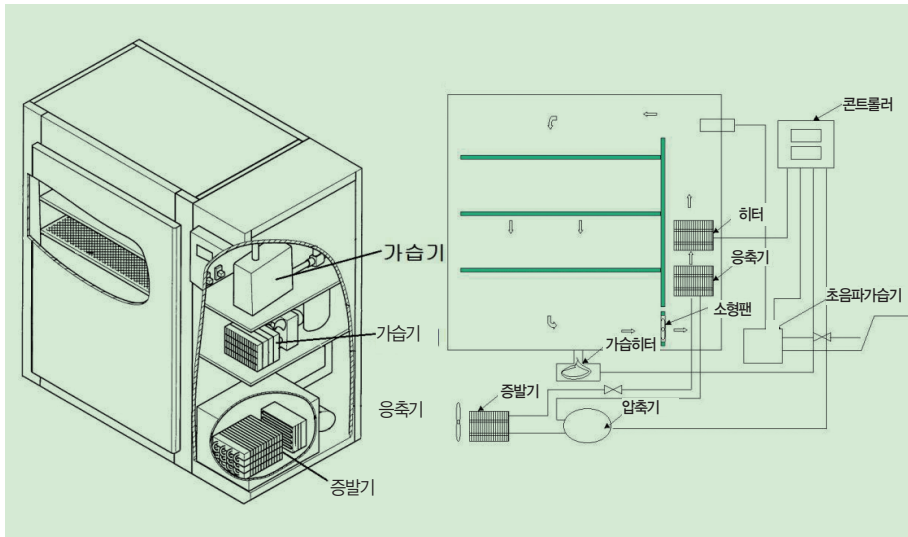
1) 발아 장치(발아실)

발아 장치는 씨앗의 싹틔우기를 위해 온·습도, 빛(광) 등의 환경조건을 인위적으로 제어하는 장치이다. 싹틔우기(발아) 장치는 고정식, 독립식과 이송기구에 의해 씨뿌리기(파종)와 싹틔우기(발아), 모종 기르기(육묘)가 차례로 이루어지는 연속식으로 분류한다.

고정식은 국내 공정육묘장에 보급되어 있는데, 샌드위치 패널이나 벽체로 구성된다. 냉방장치와 난방장치로 온도를 조절하고 2류체 노즐로 미세입자를 분사하여 습도를 조절한다. 온도조절 범위는 10~30℃이고, 상대습도 조절 범위는 65~95%이다. 난방은 바닥난방과 전기히터방식이 있으며, 바닥난방은 온도를 높여 포화습도를 유지할 수 있다. 난방이 필요하지 않거나 냉방이 필요한 시기에는 미세입자를 분사하여 습도 조절이 가능하다.

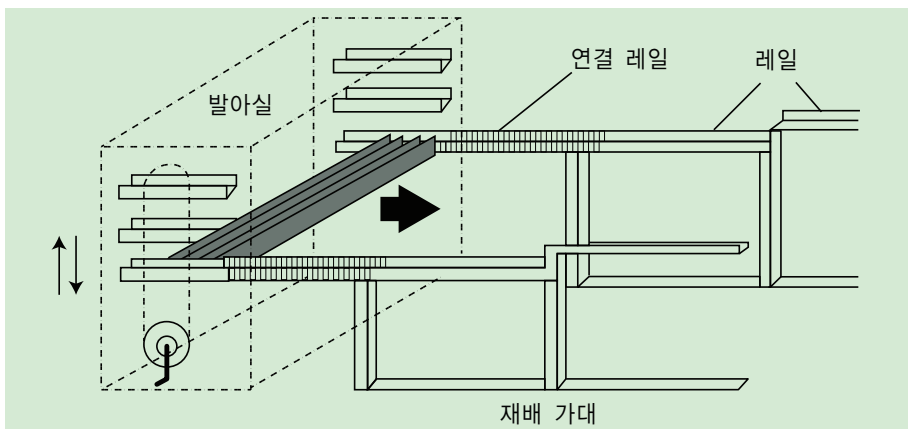
독립식은 발아 장치 안에 냉각가온장치가 장착되어 있어 온·습도 제어 및 이동을 할 수 있다. 농촌진흥청 국립농업과학원에서 개발한 발아장치는 벽면에서 아래로 물이 순환하면서 온도를 조절하고, 초음파 가습장치에 의해 습도를 조절한다. 온도는 바닥면 수조의 물을 히터로 데우거나 냉동기에 의해 냉각하여 조절한다. 습도는 초음파 진동자에 의해 발생한 습기를 발아 장치 위쪽으로 주입하여 조절한다. 발아 장치 설정 온도범위는 15~35℃이고 습도는 100%로 제어할 수 있기 때문에 **치상¹⁾** 후 별도의

수분보충이 필요하지 않다. 청치마 상추는 온도 20~24℃, 상대습도 100%로 설정하면 96% 이상 발아한다.



〈그림 3-23〉 초음파가습식 발아 장치(농촌진흥청)

연속식 발아 장치는 컨베이어와 반출장치에 의해 씨뿌리기(파종) 작업이 끝난 트레이를 싹틔우기(발아) 단계에서 모종을 기르는 단계로 자동 이송하는 장치이다. 이송공정은 씨를 뿌린 후 발아실 → 육묘실 → 재배실 순으로, 컨베이어벨트에 의해 이송하거나 발아실 내 발아상을 쌓아 위아래로 이동할 수 있는 레일을 설치하여 이송한다. 일본 전력중앙연구소에서는 씨앗이 싹틔우면 발아상 레버를 돌려 발아상 레일 높이를 재배홈통과 같은 높이로 맞춘 다음 재배홈통과 발아실 사이에 연결레일을 놓아 재배홈통을 반출한다.



(그림 3-24) 발아실로부터 재배 베드 이동방법(일본 전력중앙연구소)

2) 육묘 장치

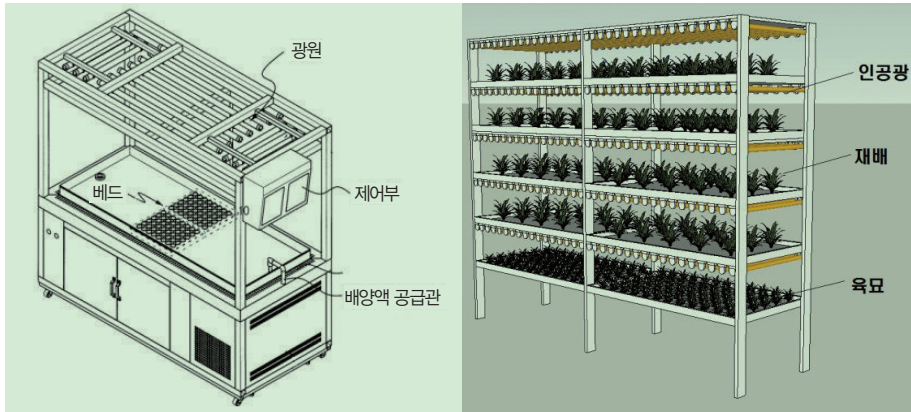
육묘 기간의 발육상태는 아주심은 후(정식 후)의 생육과 수량에 영향을 미친다. 건전한 모종을 생산하기 위해서는 싹이 튼 모종이 연약하거나 웃자라지(도장) 않고 뿌리 발달이 양호하도록 관리해야 한다. 싹이 튼 후 육묘상은 적정 온·습도를 유지하고 빛과 양분관리도 필요하다.

양액육묘는 모판흙(상토) 모종 기르기에 비해 생육이 빠르고, 병해충 발생이 적고 모판흙(상토) 만들기에 필요한 노력과 자재를 절감할 수 있다. 양액육묘 배지는 피트모스, 펄라이트, 압면, 훈탄 등이 있다. 이밖에도 씨뿌리기(파종)용 우레탄 스펀지나 압면 씨뿌리기용(플러그), 피트 블록을 이용하기도 한다.

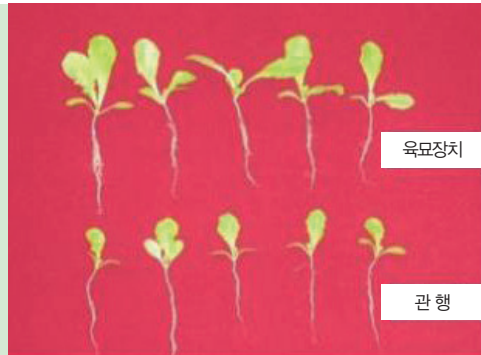
농촌진흥청 국립농업과학원에서 개발한 육묘 장치는 트레이나 포트에서 종자를 받아 이식한 후 배양액, 빛, 온도 등의 모종을 기르는 환경을 자동으로 조절하는 장치이다. 육묘 장치는 배양액을 혼합·공급하는 양액제어부, 광원을 조절하는 광제어부 등으로 구성되어 있다.

배양액은 pH 1~14, 전기전도도(EC) 0.1~5.0dS/m 범위에서 설정값을 제어할 수 있다. 온도는 10~30℃, 빛 세기(광강도)는 0~50klx 범위에서 조절 가능하다. 청치마상추를

공시재료로 하여 실험한 결과, 육묘 장치를 이용한 경우가 기존에 하던 방식보다 잎의 길이(엽장)가 22~48%, 잎의 폭(엽폭)이 11~60%로, 3~4일 생육이 더 빠른 것으로 나타났다.



〈그림 3-25〉 녹화 육묘 장치



〈그림 3-26〉 기존 방식과 육묘 장치를 이용한 모종의 생육비교

☞ 〈표 3-5〉 기존 방식과 육묘 장치를 이용한 청치마상추 생육

구 분	잎 길이(엽장)		잎의 폭(엽폭)		잎 수(엽수)		SPAD값	
	빛 보충 (보광)	자연광	빛 보충 (보광)	자연광	빛 보충 (보광)	자연광	빛 보충 (보광)	자연광
싹튼 후 12일	46.7	31.4	16.8	12.8	3	2	16.2	15.0
싹튼 후 13일	51.4	37.4	14.6	14.6	3	2	16.7	15.5
싹튼 후 14일	54.2	37.4	15.9	15.9	4	2	17.3	15.7
싹튼 후 15일	54.8	44.3	13.5	13.5	4	3	16.9	15.9

아주심기(정식)

아주심기(정식)는 기른 모종을 포트나 재배 배지에 옮겨심는 작업을 의미한다. 아주심기(정식) 과정에서 병원균 감염이나 물리적인 손상 등이 일어날 수 있기 때문에 세심한 주위가 필요하다.

농촌진흥청 국립농업과학원에서 개발한 정식 로봇은 플러그 트레이에서 키운 모종을 포트에 옮겨심는 로봇이다. 가는 핀 4개로 플러그 트레이에 담겨 있는 모판흙(상토)을 경사지게 찢어 끄집어내는 방법을 적용하여 아주심기(정식) 과정에서 발생할 수 있는 모종의 상처를 줄일 수 있도록 설계했다. 상추의 경우는 트레이 모종 기르기에 아주심기(정식) 좋은 시기는 씨를 뿌린 후 3주가 좋다. 이 시기에는 트레이 내부에서 뿌리 감김이 좋아 옮겨심는 도중에 뿌리 주변(근권부) 흙의 부스러짐이 적기 때문에 옮겨심은 후 뿌리내림(활착)이 잘된다.



a) 2주 후



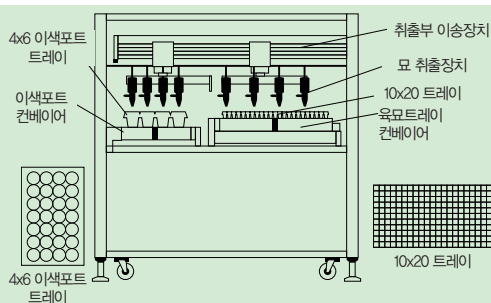
b) 3주 후



결구상추의 뿌리 주변(근권) 형성 정도



아주심기(정식) 작업



정식 로봇 구조

〈그림 3-27〉 정식 로봇(농촌진흥청)

재배시스템

가. 간격조절장치

식물공장의 생산성을 높이기 위해서는 작물생육에 최적인 환경을 조성해 성장속도를 높이고 재배기간을 단축해, 단위면적당 심는 포기 수를 최대한으로 늘려야 한다.

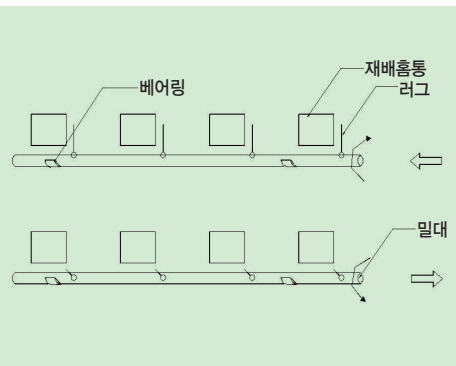
간격조절장치는 아주심기(정식) 단계에서 거두기(수확) 단계로 재배함을 이동시키면서 작물 사이의 간격을 조절하는 장치이다. 생육 초기에는 간격을 좁게해 재배하다가 생육 후기로 가면서 간격을 늘려 면적이용률을 향상시킨다.

1) 리그식

리그식 간격조절장치는 재배함통 아래 원형 축에 리그를 설치하여 축의 전·후진 동작과 회전으로 이송과 재배 간격을 조절하는 방식이다. 축에는 작물의 생육단계별로 일정거리마다 리그가 부착되어 있다. 축이 전진할 때 리그는 90° 회전하여 수직 방향으로 세워지고, 리그가 재배함통 사이에 있게 되면 축이 앞으로 가면서 재배함통의 이송과 함께 간격이 조절된다. 이송이 끝나면 축이 회전하여 리그가 수평 방향으로 눕고 축이 후진하여 처음 위치로 되돌아온다. 이 방식은 독일, 네덜란드 및 벨기에 대규모 식물공장에서도 채택하고 있다.



〈그림 3-28〉 리그식 간격조절



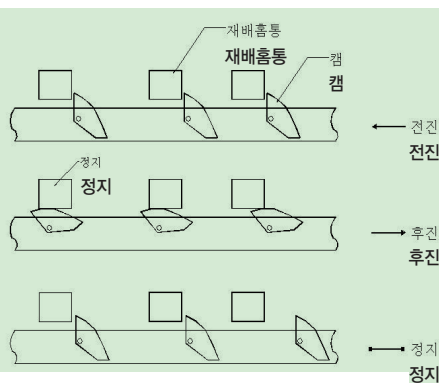
〈그림 3-29〉 리그식의 작동원리

2) 캠식

캠식 간격조절장치는 재배홈통을 지지하는 프레임 아래에 편심캠을 설치하여 편심캠 회전운동과 프레임 내부 밀대의 전·후진에 의해 이송과 간격을 조절한다. 재배홈통을 미는 역할을 하는 밀대에는 작물의 생장 정도에 알맞게 일정거리마다 캠이 부착되어 있다. 밀대가 전진할 때는 밀대에 부착된 캠이 세워진 상태에서 전진하여 재배홈통을 밀어내어 재배홈통이 이송되면서 간격이 조절된다. 후진 시에는 캠이 재배홈통보다 앞으로 기울여 재배홈통을 통과하여 처음 위치로 되돌아온다.



〈그림 3-30〉 캠식 간격조절



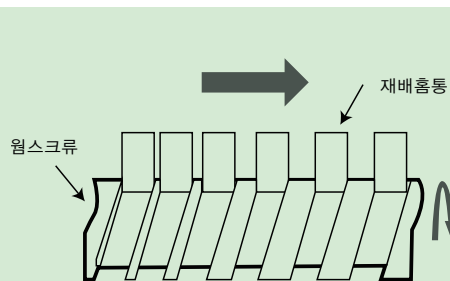
〈그림 3-31〉 캠식의 작동원리

3) 스크류식

스크류식 간격조절장치는 웜기어의 나사산 피치를 점점 크게 하여 웜기어가 회전하면 작물이 심어진 재배홈통이 수확실로 이송되면서 웜의 피치만큼 간격이 조절된다.



〈그림 3-32〉 웜스크류



〈그림 3-33〉 웜스크류의 작동원리

스크류식은 간격을 미세하게 조절할 수 있지만 월기어의 나사산 가공이 까다로운 단점이 있다. 이 방식은 일반적인 간격조절방식은 아니지만 미국의 화이트 팜사에서 운영하고 있다.

4) 갠트리식

갠트리시스템은 시설 내부에 갠트리(Gantry)를 설치하여 아주심기방(정식실)에서 재배실로 레일을 통해 왕복 이동하면서 재배홈통을 이송하여 수확실로 반출한다. 갠트리에 벌레 포집용 끈끈이를 부착하여 침입한 벌레를 포획하기도 하고 빈 재배홈통을 옮겨심는 장소로 이동시키는 작업도 가능하다.

일본 구주전력시스템은 담액수경 재배조 위에 놓인 재배패널 좌우에 구멍이 뚫린 패널을 갠트리의 हु으로 들어 올린 후 담액수경 재배조로 이송하는 방식이다.

갠트리시스템을 설치·운영하기 위해서는 식물공장의 구조를 튼튼하게 설계해야 한다. 또한 재배동 간 이동이 원활하도록 설계해야 한다.



일본 구주전력



네덜란드

〈그림 3-34〉 갠트리시스템

5) 리그 앤드 슬라이딩식

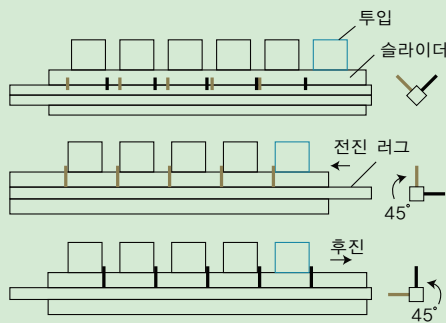
리그 앤드 슬라이딩식 간격조절장치는 슬라이더의 미끄럼 직선운동과 리그 스톱퍼의 정지작용에 의해 재배홈통의 이송과 간격을 조절하는 방식이다. 슬라이더 아래에 설치된 축에는 작물의 생육단계에 따라 일정거리마다 리그가 부착되어 있다. 슬라이더가 전진할 때는 축이 45° 회전하여 리그가 위쪽을 향하여 재배홈통이 더는 전진하지

못하도록 한다. 슬라이더가 후진할 때는 축이 반대로 45° 회전하여 재배홈통이 후진하지 못하도록 하여 간격을 조절한다. 슬라이더 후진이 끝나면 축은 원위치로 되돌아온다. 러그 앤드 슬라이딩식 간격조절장치는 농촌진흥청에서 운영하고 있다.

6) 간격조절 단계 설정

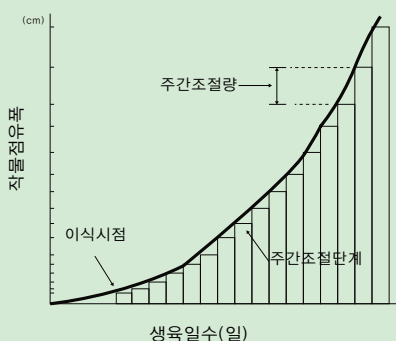


〈그림 3-35〉 러그 앤드 슬라이딩식

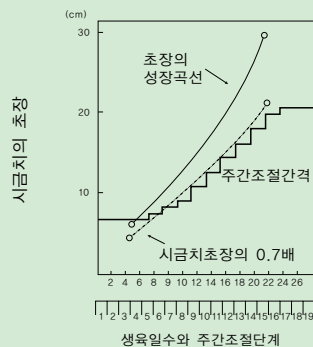


〈그림 3-36〉 러그 앤드 슬라이딩식 작동원리

잎채소류(엽채류)는 열매채소류(과채류)와 달리 생식생장기가 없으므로 싹트는 시기(발아기), 생육기, 축진기로 나누어서 간격조절 단계를 설정한다. 작물을 재배홈통에 옮겨심은 후에는 간격조절을 하지 않고 생육 중·후기부터 단계별로 조절한다. 작물 생육이 왕성한 시기에는 간격조절량을 늘려준다. 간격조절장치를 설계할 경우, 작물의 모종 기르는 기간이 짧으면 초기의 조절간격이 재배홈통의 폭으로 결정되며 생장이 진행됨에 따라 간격조절 단계를 설정한다. 생육기간이 짧은 작물은 직선적 성장을



〈그림 3-37〉 성장곡선과 포기 사이 거리 조절량



〈그림 3-38〉 시금치 성장곡선

가정하여 간격을 설정할 수 있다.

실제로 일본 시코쿠의 식물공장에서는 시금치 생장곡선에 따라 시금치 줄기 길이(초장)의 0.7배 정도로 간격을 조절하고 있다.

♣ 간격조절 단계 설정 시 유의사항

- 작물의 생장모델에 따라 작물의 포기 사이 간격 단계를 설정한다.
- 작물의 생장일수에 따른 점유폭의 변화로 생장모델을 설정한다.
- 생장모델의 일일 생장속도에 따라 일일 간격조절량을 결정한다.
- 농촌진흥청 국립농업과학원(자연광 식물공장, 청치마상추 재배) 설정 예

단계	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
생육일수	0	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
조절 간격(cm)	6	7	8	10	12	14	17	20	24	28	34

인삼 다단 재배의 경우, 비닐하우스에 빛을 차단하는 시설(차광시설)과 3단 재배상을 설치하여 모종 삼에서부터 2~3년근 인삼과 5~6년근 인삼을 생산한다. 인삼 재배용 모판흙(상토)은 마사토, 약토^{*)}, 피트모스, 펄라이트, 질석 등을 혼합하여 사용한다.

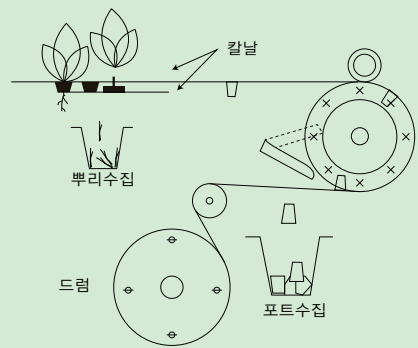


〈그림 3-39〉 다단 재배 베드(경상북도농업기술원)

인삼을 수확한 후, 증기살균 시스템으로 재배상 내 상토를 살균하고, 양분 공급량을 제어하여 연작장해를 방지한다.

수확

식물공장에서 거두기(수확)는 주로 수작업에 의존하고 있는데, 잎을 한 장씩 거두거나 포기를 거둔다. 기계 수확에는 줄기를 절단하는 방식, 뿌리를 절단하는 방식, 줄기와 뿌리를 절단하는 방식이 있다. 농촌진흥청은 ㄱ형 재배함통의 스트립을 회전 드럼에 감으면서 회전 칼날로 뿌리와 줄기를 절단하는 수확장치를 개발한 바 있다. 일본 구주전력은 재배함통을 들어 올려 거꾸로 매달아 줄기를 절단하는 방법으로 수확한다. 시코쿠 식물공장에서는 회전 칼날로 뿌리와 줄기를 절단하는 수확장치를 개발했다. 이밖에도 다관절 수확 로봇 등이 개발된 바 있다.



〈그림 3-40〉 잎채소(엽채소) 수확기(농촌진흥청)

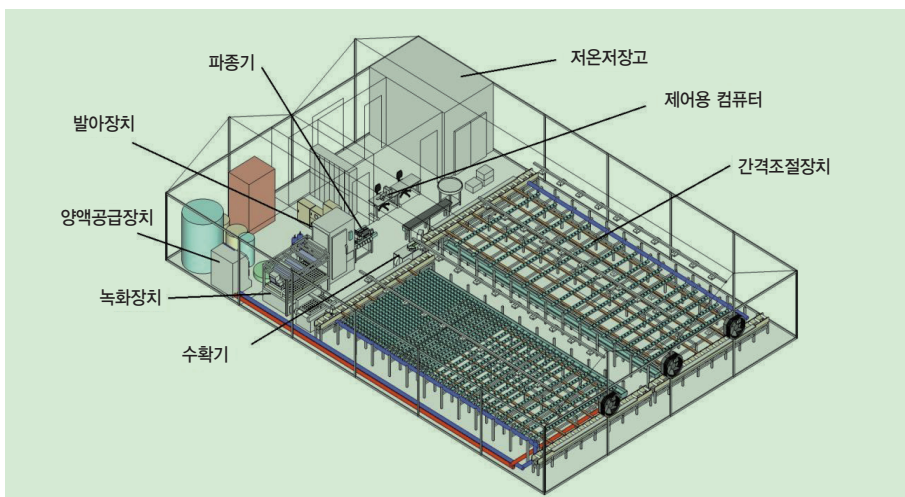
Tip.

v1 약토

부엽토와 썰거 등을 혼합하여 완전히 부숙시킨 퇴비

6 환경제어

자연광 식물공장은 외부 환경이 온실 내부에 직접 영향을 주기 때문에 외부 환경을 파악하지 않고 내부 조건만 제어하는 데에는 한계가 있다. 환경제어 요인에는 냉·난방 제어, 스크린, 유동팬, 물주기(관수), 전등조명(전조), 빛 보충(보광) 등이 있다. 자연광 식물공장은 작물을 연중 생산하기 위해 온도, 습도, 빛, 이산화탄소(CO_2) 농도 등을 작물 생육에 적합하도록 제어한다. 자연광 식물공장은 태양광을 주로 이용하며 고압 나트륨램프, 메탈헬라이드 램프, LED 등을 보조광원으로 사용한다. 자연광 식물공장은 유리온실의 환경제어장치, 광제어장치, 냉방장치가 필요하다. 자연광 식물공장은 24시간을 주기로 온도, 상대습도, 이산화탄소(CO_2) 농도, 공기순환 등이 변화하기 때문에 이들 환경인자는 동시에 제어되어야 한다. 그렇지만 환경요인들 간에 상호작용으로 각 환경요인을 모두 충족시키기는 어렵다.



〈그림 3-4〉 자연광 식물공장 기계장치 배치와 환경제어

예를 들어 실내온도가 높아 온도를 낮추기 위해 창을 열어 환기를 하면 실내온도는 떨어지지만 이때 습도도 같이 떨어진다.

환경조절요소 및 대상의 주요 목적은 아래 표와 같다.

환경제어장치

 <표 3-6> 환경조절요소 및 대상

요소 및 대상	목 적
인공광원	어두운 실내외를 밝힘, 식물의 성장 및 광합성 촉진
환 기	태양 복사열의 방출, 상대습도의 감소, 증발·증산의 촉진, 증발 냉각장치 가동, 주간에 작물의 생장을 위한 탄산가스 공급
보 온	외부로의 열방출 억제, 내부 온도유지
난 방	증발과 증산 등으로 인한 열손실 보상
냉 방	실내의 온도를 낮춤
공기 순환	내부 공기를 고르게 분포시킴
이산화탄소(CO ₂)	광합성(탄소동화작용)에 필요한 이산화탄소 공급
빛 차단(차광) 및 빛 보충(보광)	태양복사에너지 조절을 위해 적절한 빛 차단(차광), 자연광 빛 보충(보광)을 위해 보광등으로 자연광 부족분 보충
습도조절	습도가 지나치게 많을 때 환기, 온도 높이기 또는 습기제거(제습), 습도가 목표치 이하로 떨어지면 가습 등으로 적습유지

환경제어장치는 식물공장 내부 환경을 작물 생육에 적합한 환경으로 조성하기 위해 시설 내부에 부착된 환기창, 팬, 커튼이나 냉·난방장치, CO₂ 공급기, 양액시스템 등을 통해 온도, 습도, 습도, 이산화탄소(CO₂) 등의 각종 환경을 인위적으로 조절해 주는 장치이다.

환경제어장치는 내·외부 기상 센서, 제어기(PLC, 마이크로 컨트롤러, 산업용 PC, 제어용 프로그램, 제어반, 작동기) 등으로 구성된다.

가. 환경제어용 센서

지상부 환경제어용 센서에는 빛(광), 온도, 습도, 이산화탄소(CO₂), 풍향, 풍속, 감우(비가 오는 것을 감지)센서가 있으며, 양액제어를 위한 센서에는 pH, EC, 이온, 산소, 수위센서가 있다. 지상부와 지하부 환경 요소의 계측센서 및 제어수단은 <표 3-7>과 같다.



<표 3-7> 환경 요소의 주요 계측센서 및 제어수단

구분	환경 요소	계측센서	제어 수단
지상부 환경	빛(광)	일사센서	빛 차단(차광), 빛 보충(보광), 인공광
		광양자센서	
	기온	열전대 측온저항체 복사온도계	환기, 난방, 냉방
	습도	전자식습도센서 건습구온도계	환기, 가습, 제습
	이산화탄소(CO ₂) 농도	적외선 가스센서	환기, 이산화탄소(CO ₂) 공 급
지하부 환경	풍속	열선풍속계 회전형 풍속계	환기, 강제순환
	지온, 수온	열전대 측온저항체	난방, 냉방
	수분	수분장력센서 TDR센서	관수, 배수
	pH	pH센서	알칼리 또는 산 공급
	전기전도도(EC)	전지전도도센서	농후액 공급 또는 희석
	용존산소	용존산소센서	통기, 냉각

1) 광센서

광센서는 광원의 질과 양을 측정한다. 온실 외부의 빛(광) 측정은 일사량센서를 사용하며, 태양광 또는 인공광원에서 발광된 광양자속 측정은 광양자센서를 사용한다. 농업용 일사량센서는 0~2,000±25W/m² 정도면 사용 가능하다. 광센서는 태양광의



양과 질을 측정해 온실 안으로 들어오는 에너지양을 산출하는 데 이용한다.
제어기는 에너지양을 산출하여 내부 온도 값을 변화시킨다. 온수 난방은 구름이 많으면 미리 난방관 수온을 올리거나 천창을 일부 닫는다. 낮에 갑자기 빛의양이 줄어들면 소나기로 인식해 천창의 개폐 각도를 줄이는 등의 제어를 수행한다.

 **〈표 3-8〉 광센서 사양**

센서명	사 양
일사량	○ 측정방법 : Silicon Photodiode ○ 측정범위 : 0~2000W/m² ○ 정확도 : ±25W/m² ○ 작동환경 : -30~+50℃
광양자	○ 측정방법 : 실리콘 광전지 ○ 측정범위 : 0~2,500μmol m⁻² s⁻¹ ○ 정확도 : ±5% ○ 작동환경 : -25~55℃

2) 풍향, 풍속, 감우센서

풍향센서는 기상청에서 많이 사용하는 일반 풍향계와 풍향, 풍속을 함께 측정할 수 있는 프로펠러식 풍향풍속센서가 있다.

풍향센서는 기다란 깃발이나 화살깃 모양 또는 닭 모양 등 모양이 다양하다. 비행기의 수직 꼬리날개와 비슷한 모양으로 풍속 측정을 겸한 것도 있다. **가변저항기(퍼텐쇼미터, Potentiometer)^{v1}**를 이용하거나 **로터리 인코더(Rotary Encoder)^{v2}**에 의해 회전각도에 해당하는 **펄스(Pulse)^{v3}**를 세는(카운트하는) 방식으로 풍향을 측정한다.

풍속센서는 풍속에 의한 회전차 발전방식이 일반적으로 사용되며, 단위시간당 펄스

Tip.

v1 가변저항기(퍼텐쇼미터, Potentiometer)

퍼텐쇼미터는 직선변위와 회전변위를 전기저항의 변화로 바꾸는 가변저항기로, 전위차계라고도 한다.

v2 로터리 인코더(Rotary Encoder)

전기모터나 엔진의 회전각도 또는 회전속도를 측정할 때 사용하는 대표적인 센서

v3 펄스(Pulse)

전압 또는 전류의 급격한 변화의 반복을 말한다.

를 계수하는 방식도 사용된다.

풍향풍속센서는 방향에 따라 환기창의 각도와 여는 쪽을 제어하거나 일정 이상의 풍속이 되면 창을 닫는 등의 제어에 활용한다. 또한 풍속을 측정하여 풍속에 따른 외부 열 손실을 계산하는 데 이용한다.

감우(또는 강우) 감지기는 눈이나 비가 오는 것만 감지하면 되므로 더욱 간단한 검출용 센서를 사용해도 된다. 비가 올 때 천창을 닫거나 열린 각도를 낮춰 비가 온실 안으로 들어오는 것을 막는다.



〈표 3-9〉 풍향, 풍속, 감우센서 사양

센서명	사 양
풍향센서	○ 측정방법 : Wind Vane and Potentiometer ○ 측정범위 : 0~360 ° ○ 반응시간 : 5초 ○ 정 확 도 : $\pm 3^{\circ}$ ○ 작동환경 : $-30\sim+50^{\circ}\text{C}$
풍속센서	○ 측정방법 : Wind Cups and Magnetic Switch ○ 측정범위 : 0~50m/s ○ 반응시간 : 5초 ○ 정 확 도 : $\pm 0.5\text{m/sw}$ ○ 작동환경 : $-30\sim+50^{\circ}\text{C}$
감우(강우)센서	○ 측정방법 : Verify Conductivity Over Gold Grid ○ 측정범위 : 0~200mm ○ 측정단위 : 1.0mm ○ 작동환경 : $-30\sim+50^{\circ}\text{C}$

3) 온도센서

온도센서는 일반적으로 열전대¹⁾나 측온저항체²⁾를 사용한다. 온도는 장소에 따라, 측정위치에 따라 측정값의 차이가 있기 때문에 적절한 위치에 센서를 설치하는 것이 좋다. 센서는 작물이 자라는 높이에 맞추어 조절해 주는 것이 좋다. 또한 햇빛이 직접 닿으면 온도가 급격히 상승하여 오작동할 수 있으므로 직사광선이 직접 닿지 않도록 백색도장이나 알루미늄 은박지 등으로 복사 막이를 설치한다.

외부온도센서는 수직 방향으로 지표면 근처의 기온 차이가 크기 때문에 통풍이 잘되

는 넓은 잔디밭 위에 백엽상을 설치하여 지상 1.5m 높이에서 측정하는 것이 좋다. 그러나 풍향, 풍속, 감우센서 등과 함께 외부 기상관측 센서와 같이 외부기상대 또는 시설 윗부분에 설치하는 것도 가능하다.

4) 습도센서

습도센서는 대기 중에 포함된 수증기의 양을 간접적으로 나타내는 지표로, 온도와 마찬가지로 중요한 환경제어 변수 중의 하나이다. 세라믹식, 고분자식 습도센서가 주로 이용된다.

세라믹센서는 작고 무게가 가볍고 측정 범위가 넓으며, 부식에 강하다(내부식성 우수). 그러나 시간이 지나면서 불순물에 의한 오염이 생기고, 특성 변화가 일어나기 때문에 정확도가 떨어진다.

고분자식센서 중 전기저항형은 오염에 강하고 가격이 저렴하지만 고분자물질의 특성 때문에 온도계수가 크고 30% 이하, 90% RH 이상의 환경에서는 사용이 제한된다. 용량형은 $-35\sim 80^{\circ}\text{C}$ 범위에서 사용할 수 있고 10~95% RH 정도의 넓은 범위에서 직선적인 특성을 나타내며, 오염에 강하고 내구성이 뛰어나다.

5) 이산화탄소(CO_2)센서

이산화탄소(CO_2)센서는 이산화탄소 농도를 측정하기 위한 센서로, 이산화탄소는 무색, 무취의 기체로 압력을 가하면 쉽게 액체로 변하며 식물의 탄소동화작용으로 고정되어 유기 탄소화합물이 되어 다른 생태계에 이용되는 등 중요한 탄소원이다. 비분산 적외선 흡수방식(NDIR)의 센서는 적외선램프로부터 방출된 $4.2\mu\text{m}$ 파장의 빛이 센서에 도달하는 과정에서 이산화탄소(CO_2) 농도에 따라 줄어드는 빛의 양을 센서에서 검출하는 방식으로 이를 전기적인 신호로 변환하여 측정하는 센서이다. 식물공장에서 이산화탄소(CO_2)센서는 센서의 정확도가 높은 이중센서가 적합하다.

Tip.

v1 열전대

2종의 금속선의 접합점을 가열 또는 냉각시킬 때 제베크효과로 발생하는 열기전력을 이용한 온도센서

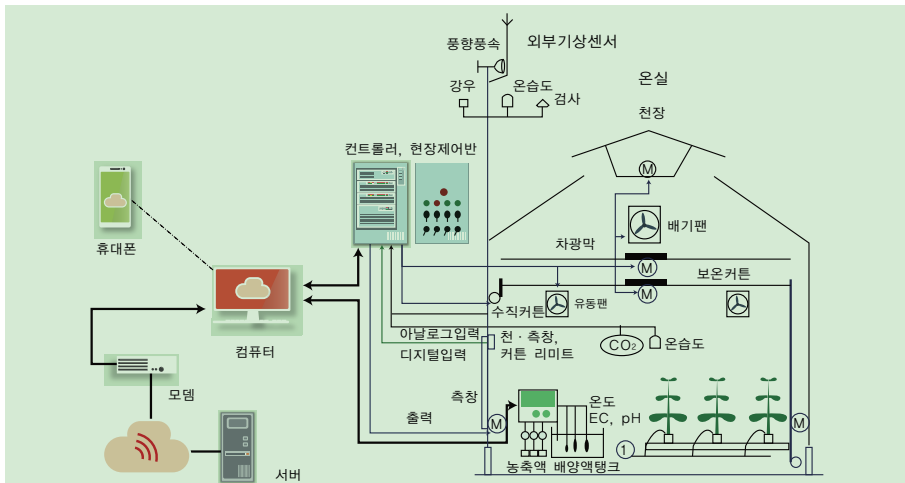
v2 축온저항체

전기저항이 온도에 따라 변화하는 성질을 이용한 온도측정용의 저항체

나. 제어시스템

제어시스템(제어장치)은 지상부 환경과 뿌리 주변(근권부) 양액 상태를 제어하는 장치이다. 제어시스템은 센서, 인터페이스부, 제어기, 작동기, 감시제어부 등으로 구성된다. 환경계측을 위한 센서는 온도, 습도, 풍향, 풍속, 일사량, 비(강우), 이산화탄소(CO₂)센서 등이 있고 인터페이스부는 신호처리부(증폭, 필터링), A/D 및 D/A변환기¹⁾ 등이 속한다. 제어기는 PLC, 마이크로 컨트롤러, 산업용 PC 등이 있으며, 제어기는 사양, 제어 알고리즘과 제어논리에 따라 성능에 차이가 발생한다. 작동기에는 히트펌프, 온풍기, 보일러, 커튼, 천·측창, CO₂ 발생기, 물주기(관수)장치 등이 포함된다. 감시제어는 컴퓨터, 스마트폰 등으로 이용하고 있다.

자연광 식물공장에 적용되는 제어시스템은 인공광 식물공장에 적용되는 식물공장보다 제어요소도 많고 제어논리 또한 복잡하다.



〈그림 3-42〉 자연광 식물공장 제어시스템 모식도



환경제어기술과 예

환경제어는 24시간을 주기로 환경조건에 적합하도록 유기적으로 이루어져야 한다. 온도와 빛의 양(광량)은 항상 균형을 이루어야 한다. 따라서 측정된 빛의 세기에 따라 온도를 조절하여야 하고 CO₂ 농도 역시 광량에 따라 조절해야 한다.

공기 중에는 열, 수증기, 이산화탄소(CO₂)가 포함되어 있다. 환기창이 열리면 온도, 상대습도, 이산화탄소(CO₂) 농도도 변한다. 환기창이 열리면 열과 수증기가 외부로 빠져나가면서 온도는 적정 수준까지 떨어지지만 상대습도도 급격히 낮아질 수 있다.

가. 온도제어

1) 식물과 온도 환경

식물이 광합성으로 탄수화물을 만들고 뿌리에서 무기양분과 수분을 흡수하는 등 다양한 대사활동은 온도에 따라 달라진다. 식물은 온도가 높아지면 자신의 체온을 유지하기 위해 잎을 통해 수분을 밖으로 배출한다. 이때 배출하는 양이 뿌리에서 흡수하는 물의 양보다 많아지면 시들고(위조되고) 호흡이 빨라져 저장양분 소모량이 증가한다.

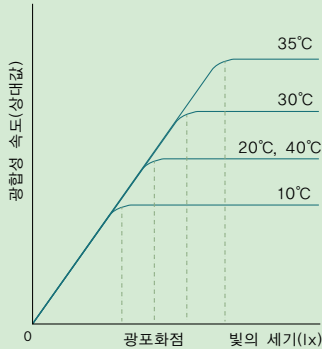
이산화탄소(CO₂) 농도가 일정하고 빛이 강할 경우에는 온도가 높을수록 광합성량이 증가하고, 빛이 약할 때는 온도의 영향을 거의 받지 않는다. 일반적으로 40℃를 넘어가면 광합성량은 급격히 줄어든다. 광합성은 온도가 30~40℃일 때 가장 활발하게 일어나며, 10℃ 이하이거나 40℃ 이상에서는 거의 일어나지 않는다. 이것은 광합성에 여러 가지 효소가 작용하기 때문인데, 효소가 작용할 수 있는 최적 온도는 30~40℃이다. 그렇지만 30~40℃에서는 호흡량도 증가하기 때문에 식물의 종류에 따라 차이가 있지만 일반적으로 식물이 자라는데 적합한 온도(생육적온)는 15~27℃ 정도이다. 광합성에 영향을 미치는 환경요인은 각각 독립적으로 작용하는 것이 아니라 상관관계를 맺고 작용한다. 따라서 다른 조건이 아무리 충분해도 어느 한 가지 조건이 부족

Tip.

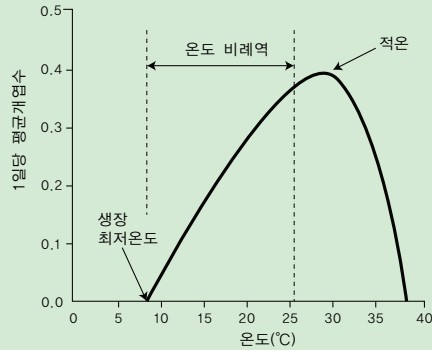
v1 A/D 변환기, D/A 변환기

A/D 변환기(Analog to Digital Converter)는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시키는 장치이다. D/A 변환기(Digital to Analog Converter)는 A/D 변환기와 반대로, 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환시킨다.

하면 광합성은 제한을 받는다.



〈그림 3-43〉 온도와 광합성



〈그림 3-44〉 식물의 온도반응 곡선

식물의 광합성은 온도가 높아짐에 따라 증가하고 어느 한계온도까지는 식물 발달이 양호하지만 광합성에 필요한 온도는 그다지 높지 않다. 즉 광합성 최적온도와 식물체 발달 최적 온도에는 차이가 있다.

작물이 재배적온을 벗어난 저온이나 고온 환경에서는 장애를 받게 되는데, 생육 한계 온도에서 계속 재배되면 생육억제가 나타난다. 일반적으로 낮 생육적온이 높은 작물이 밤 생육적온과 최저 한계온도도 높게 나타나는 경향이 있다.

온도를 관리할 때 주의할 점은 공기 중의 온도가 높다고 식물체 온도가 높은 것은 아니라는 것이다. 자연광 식물공장에서는 아침에 해가 뜰 때 식물체 위쪽의 잎과 과일 온도가 먼저 올라가고 공기가 데워진다. 그다음 공기의 온도에 의해 아래쪽의 식물체와 과일 온도가 상승한다. 위쪽 잎에서는 증산으로 온도가 낮아지지만 과일은 증산이 일어나지 않아 온도가 낮아지지 않는다. 아래쪽의 과일은 온도가 낮아 데워진 공기와 온도 차로 인해 과일 표면에 물이 맺히고(결로) 이 때문에 품질이 낮아진다. 물이 맺히는 현상(결로)을 억제하기 위해 환기를 급격하게 하면 실내 온도가 변해 식물이 스트레스를 받기 때문에 주의해야 한다



〈표 3-10〉 채소류의 생육적온과 한계온도

(단위: °C)

구 분		최저 한계온도	생육적온	최고 한계온도
가지과	토마토	5	20~25	35
	가지	10	23~28	35
	고추	12	25~30	35
박과	오이	8	23~28	35
	수박	10	23~28	35
	멜론	15	25~30	35
	참외	8	20~25	35
	호박	8	20~25	35
잎 · 뿌리채소	시금치	8	15~20	25
	무	8	15~20	25
	배추	5	13~18	23
	셀러리	5	15~20	23
	썩갓	8	15~20	25
	결구상추	8	15~20	25
장미과	딸기	3	18~23	30

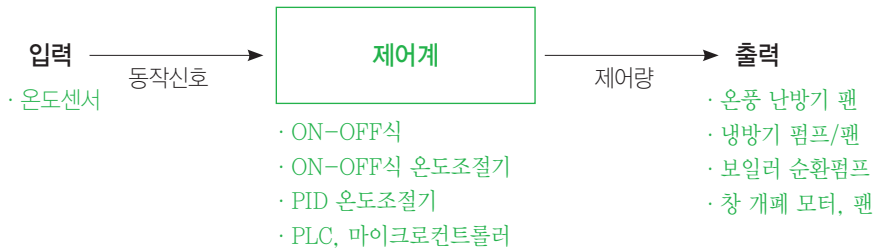
자연광 식물공장의 기온 제어는 일반 온실의 제어방법을 적용할 수 있다. 시설의 벽면에는 유리나 플라스틱 필름을 사용하므로 인공광 식물공장에 비해 벽면의 단열성이 낮아 겨울철에는 난방이 필요하다. 여름철 낮 동안에는 태양열에 의해 실내 기온이 바깥 기온 이상으로 올라가기 때문에 환기나 차광에 의한 온도상승 억제나 냉방이 필요하다.

작물의 광합성이나 형태형성에 관여하는 400~800nm 파장역의 에너지는 일사에너지가 절반을 차지한다. 나머지 절반 정도는 800~3,000nm의 근적외선(열선)이며, 이 파장역은 실온을 상승시키는 원인으로 작용한다. 따라서 일사에너지의 약 반을 차지하는 열선 부분을 반사하는 덮는 자재(피복 자재)를 사용하여 여름철 온실 안의 온도상승도 억제할 수 있다. 열선의 흡수, 반사 기능을 가진 필름을 2장의 유리판 사이에 끼워 넣어 열 차단 효과를 높인 덮는 자재(피복 자재)를 일본의 일부 자연광 식물공장에서 사용하고 있다.

양액 온도제어는 공조에는 포함하지는 않지만, 공조와 연관성이 있다. 수경재배에서 여름철 온도가 높을 때 작물의 생육 불량은 냉방이 곤란한 경우 양액 냉각으로 어느 정도 극복할 수 있다. 겨울철 온도가 낮을 때는 난방뿐 아니라 양액을 가열하는 것도 효과적이다.

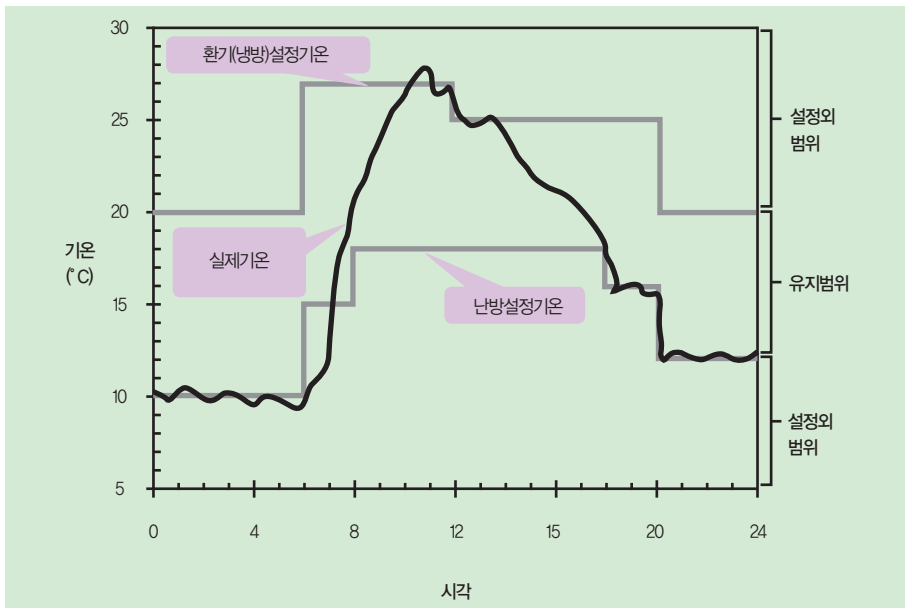
2) 온도제어 예

인공광 식물공장에서 목표온도를 유지하기 위해서는 환기, 난방과 냉방이 필요하다. 온도센서로 온도를 측정하고 제어계에서 제어명령을 수행하며, 온풍 난방기, 보일러, 창, 스크린 등을 작동하여 온도를 조절한다.



〈그림 3-45〉 온도제어 모식도

자연광 식물공장에서 난방은 온풍 난방기 또는 온수 보일러에 의해 작물 생육별로 주야간 온도를 다르게 변온관리한다. 히트펌프 난방시스템은 공기-공기식 또는 물-공기식 등을 사용하여 난방 할 수 있다.

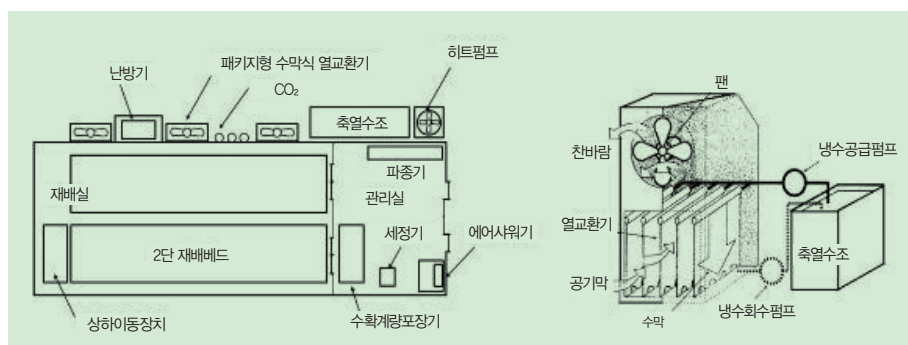


〈그림 3-46〉 환경제어 설정온도와 실제온도 예

온도 조절은 난방온도선과 환기온도선을 이용한다. 난방온도선은 24시간 주기로 요구되는 식물공장의 최저온도를 장기적으로 표시한 선이다. 환기온도선은 그 이상의 온도에서 환기가 시작되는 설정온도이다.

환기를 통해 온도를 제어할 때 창을 열림과 닫힘 온도를 사용하는 경우, 창문의 개폐가 반복적으로 일어나 구조물 수명이 짧아지고 외부조건이 급변하는 경우에는 온도변화가 심해진다. 이러한 온도변화를 줄이기 위해 타이머를 사용한다. 창 개폐 시 동작 시간과 대기 시간을 설정하면 실내 온도가 올라가기 시작해 설정온도를 넘어설 때 일정 시간 열렸다가 대기시간만큼 정지하고 동작시간만큼 다시 작동한다. 이 방식은 겨울철 환기율이 높지 않을 때 효과적이다. 날씨 변화가 심한 환절기에는 환기창을 빨리 열어야 하지만 동작속도가 느리기 때문에 정밀 제어가 어렵다.

일본 전력중앙연구소의 자연광 식물공장은 야간에 차가운 물을 축열수조에 저장해 그 차가운 물을 주간 냉방에 사용하며 덕트식 열교환기 대신에 패키지형 수막식 열교환기를 사용한다. 축열수조의 차가운 물은 부직포 사이에 들어간 폴리웨어 내부로 흐르고, 상부에 있는 팬을 작동시킴으로써 공기가 폴리웨어 표면을 지나며 온도가 낮아지고 찬바람으로 실내 온도를 낮춘다.



〈그림 3-47〉 일본 전력중앙연구소 식물공장 온도제어

오스트리아의 루스나사는 토마토 재배 시 주간에는 27℃, 야간에는 17℃로 제어하고, 일장은 주간 8시간, 야간 4시간으로 제어하고 있다. 일본 시코쿠전력그룹의 자연광 식물공장은 주간온도 22~26℃, 고도수경형인 경우 22~32℃, 야간 18℃로 설정해

관리한다. 일본 전력중앙연구소에서 개발한 자연광 식물공장은 주간 25~30℃, 야간 15~20℃로 제어하고 있다.

나. 습도제어

상대습도는 온도에 따라 변한다. 최적의 온실조건을 유지하는 데 필요한 온도는 난방과 환기로 조절된다. 난방과 환기 모두 상대습도를 조절하지만, 온도와 상대습도를 동시에 정확하게 유지하는 것이 관건이다. 습도조절은 환기온도로 조절하는데, 상대습도가 너무 낮으면 환기온도를 높게 설정하고 상대습도가 너무 높으면 환기설정 온도를 내린다. 습도조절을 위해 환기온도 설정값은 4℃만큼 올리거나 내릴 수 있다.

 <표 3-11> 습도에 따른 환기온도 설정

측정된 상대습도	환기온도	측정된 상대습도	환기온도
95	16.0	65	21.0
90	16.0	60	22.0
85	17.0	55	23.0
80	18.0	50	24.0
75	19.0	45	24.0
70	20.0	40	24.0

증산은 수분이 뿌리로 흡수되어 식물체의 표면에서 기체상태로 되어 대기 중으로 방출되는 것이다. 증산은 주로 잎 표면에서 이루어지며 각피증산(잎의 각피층에서 일어나는 증산)과 기공증산(숨구멍(기공)을 통해 이뤄지는 증산)으로 구분한다. 증산은 잎의 **수분퍼텐셜^M**이 대기 중의 수분퍼텐셜보다 클 때 일어나므로, 잎을 둘러싸고 있는 대기 중의 수분퍼텐셜을 낮추는 환기나 제습, 약한 바람을 이용하면 증산이 촉진된다.

Tip.

v1 수분퍼텐셜(Water Potential)

순수한 물화학퍼텐셜 μ_0 을 기준으로 하여 0으로 놓고, 용액·세포·토양 등 임의의 물화학퍼텐셜 μ 의 μ_0 와의 차이를 물의 부분 물 용량(V)으로 나눈 값, 즉 μ/V 이다. 생체막을 포함해서 반투막을 사이에 두고 한편에는 물, 다른 편에는 삼투압을 갖는 용액이 있을 때 물 쪽에서 용액 쪽으로 발생하는 압력의 원동력을 말한다.



♣ 증산작용에 영향을 미치는 요인

- 빛 : 빛은 잎의 온도를 높이고 기공을 열리게 하여 증산을 촉진한다.
- 공기습도 : 증산작용은 잎과 대기 간의 수증기압차(LAVPD, Leaf Air Vapour Pressure Deficit)가 커지면 왕성해진다. 따라서 대기가 건조하면 잎과 대기 간 수증기압차와 대기 수증기압차(VPD, 포차)는 커져 증산이 촉진된다.
- 온도 : 온도는 직접 작물 체온에 영향을 주거나, 공기습도에 작용하여 증산에 영향을 미친다. 즉 기온이 상승하면 공기습도는 낮아지고, 엽육세포(잎의 위, 아래 표피 사이의 잎살세포)의 수증기압은 상승하므로 증기압 부족량이 늘어나 증산이 촉진된다.
- 바람 : 적당한 바람은 잎 표면(엽면) 부근의 수증기압을 낮추어 증산작용을 촉진한다.
- 흙(토양)조건 : 토양함수량, 지온, 토양공기 등 뿌리의 수분흡수에 관계되는 요인들은 간접적으로 증산에 영향을 미친다. 뿌리의 수분흡수가 적으면 증산은 적어진다.

다. 빛(광)제어

일본 전력중앙연구소에서 개발한 자연광 식물공장은 햇빛이 강할 때 빛을 차단하는 비율(차광률) 40%의 차광커튼을 작동해 냉방부하를 줄이고, 재배실 기온과 일사량에 따라 제어한다. 보온커튼은 빛을 차단하는 비율(차광률) 100%의 반사 필름을 사용하고 있다. 이는 야간과 겨울철 보온으로 난방부하를 경감하는 것은 물론, 시금치와 같은 장일성 작물을 재배하는 경우 일장조절 역할을 한다.

빛을 차단하는 막(차광막)은 일사량에 의해 닫힌다. 이때 온도가 높아지면 환기창이 열린다. 차광막이 닫히면 안과 밖의 공기 치환율이 현저하게 떨어져 열과 수증기 제거율도 줄어든다. 따라서 차광막 아래 공기온도와 상대습도는 매우 높아진다. 이와 같은 온도와 상대습도 증가를 막기 위해서는 온도 차이나 습도 차이 등을 기준으로 스크린을 조금씩 열도록 한다.

시라카와식품 식물공장의 빛을 보충하는 램프(보광용 램프)는 일조시간이 짧은 겨울 철에는 아침과 저녁에 각각 8,000lx 정도로 빛을 보충하고, 난방은 A중유 온풍 난방기에 의해 바깥 기온 -10°C 경우에도 20°C 로 제어한다. 재배실은 식물육성용으로 개발된 고압 나트륨램프를 사용하고 있다. 램프 위치는 빛이 작물에 균일하게 쏘일 수 있도록 벤치 140cm 높이에 설치하고, 조도는 약 20klx 이상을 유지하고 있다.

일본 전력중앙연구소 방식의 식물공장은 재배 베드 상단에 빛을 보충하기 위해 400W 반사형 고압 나트륨램프를, 하단은 110W 백색 형광등을 설치했다. 고압 나트륨램프는 주간 일사량에 따라서 자동으로 1일 12시간 빛을 보충하며 백색 형광등은 주간에 계속 켜도록 제어하고 있다.

라. 이산화탄소(CO_2) 농도 제어

이산화탄소(CO_2) 농도의 최적치는 빛의 양에 따라 달라진다. 빛의 양이 증가하면 작물은 더욱 많은 양의 이산화탄소(CO_2)를 필요로 한다. 환기가 이루어지는 동안에는 많은 양의 이산화탄소(CO_2)가 밖으로 배출된다. 특히 바람이 많은 날에는 이산화탄소(CO_2) 농도를 유지하기는 어렵다. 따라서 이산화탄소(CO_2) 농도 설정치를 대기수준으로 낮추어 경비를 줄인다.

열매채소(과채류)의 경우 적당한 이산화탄소(CO_2) 농도는 1,000~1,500ppm 정도이고 경우에 따라서는 2,000ppm 이상이다. 식물공장에서는 사용이 쉬운 액화탄산가스를 사용한다.

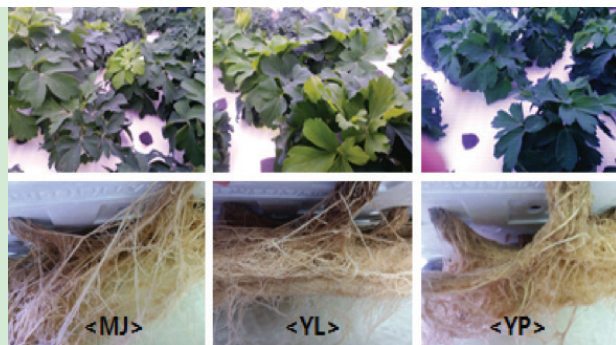
마. 양액 제어

일본 전력중앙연구소 방식의 식물공장에서 사용하는 배양액은 오오즈카하우스 A치 방 표준농도에 철을 첨가해 사용하고 있다. 배양액의 전기전도도(EC)와 pH 조정은 아침과 저녁 2번 사람이 측정해 보정한다.

시코쿠전력그룹의 자연광 식물공장의 경우 배양액 전기전도도(EC)는 1.1~1.3mS/cm, pH는 5.5~6.5, 양액 온도는 18~20 $^{\circ}\text{C}$ 이다. 고도수경형인 경우 전기전도도(EC)는 2.4~3.6mS/cm, pH는 5.5~6.5, 양액 온도는 17~23 $^{\circ}\text{C}$ 이다.

일반적으로 식물공장에서는 일본원시배양액, 야마자키 잎상추액 또는 이들 배양액의 일부 성분등을 조정한 보정 배양액등 다양한 수경재배용 배양액이 사용된다. 인

공광을 사용하는 식물공장에서 상추류와 같은 호랭성 엽채류 이외에 방풍을 수경재배할 경우 연간 1회 파종하여 1~2년 장기간 잎을 장기 수확하기 위하여 상기의 배양액을 사용하여 수경재배할 수 있다. 이때에 광원의 세기가(광강도) $150 \mu\text{mol m}^{-2}/\text{s}$ 인 형광등이나 적색 및 청색의 혼합LED를 사용하여 온도와 습도가 각각 20°C 와 50%로 제어되는 담액식 수경재배를 할 경우, 상기 배양액의 EC 및 pH는 $1.5\sim 2.0\text{mS/cm}$ 및 $5.6\sim 5.8$ 로 제어한다. 일본원시배양액의 성분을 $\text{N-P-K-Ca-Mg} = 17.33-4-8-8-4 \text{ me/L}$ 로 하고 아마자키 파드득액과 잎상추액을 사용하여 수경재배하면 아마자키 잎상추액을 사용할때보다 잎수확량은 7% 증가하며 잎내 단백질 함량은 아마자키 파드득액 처리시 12% 증가하여, 섬유질이나 총식이섬유 함량은 아마자키 잎상추액 처리시 13% 정도 증가한다. 한편, 생체중이나 건물중에는 배양액의 종류에 의한 차이가 없기 때문에 생산하는 작물의 양적생장이나 질적생장을 고려하여 일반 호랭성 엽채류 수경재배용 배양액을 방풍 수경재배에도 사용할 수 있다.



〈그림 3-48〉 처리배양액별 작물생육
(MJ : 일본원시배양액, YL : 아마자키잎상추액, YP : 아마자키파드득액)

♣ 상추재배를 위한 환경조건

- 차가운 기운을 좋아하는 호냉성 채소로 싹트기에 적합한 온도(발아적온)는 15~20°C이며 25°C 이상에서는 잠을 잔다(휴면).
- 자라는데 적합한 온도(생육적온)는 15~20°C, 최저 생육온도 5°C, 25°C 이상에서 꽃눈(화아)의 분화가 진행되고, 잎 분화에 양호한 온도 20°C 전후이다.
- 야간 온도 10°C 이하에서는 잎의 분화가 거의 이루어지지 않는다.
- 평균기온 15°C 정도에서 잎의 무게(엽중)가 늘고, 야간 온도는 10~15°C가 적당하다.
- 뿌리 둘레의 적절한 온도(적정 근권온도)는 15~20°C
- 반결구 상추와 잎상추의 주간 온도 : 생육 초기와 중기 22~26°C, 생육 후기 20~24°C (야간온도 15~20°C)
- 온실재배 상추의 최적 주간 온도 24°C, 상추 노지재배를 위한 적정온도 주간 17~28°C, 야간 3~12°C
- 상추의 광포화점 25 klx, 광보상점 1.5klx
- 광도가 지나치게 낮으면 줄기 웃자란다(차광율 35% 이하).
- 이산화탄소(CO₂) 농도 1,000mg·L⁻¹과 2,000mg·L⁻¹를 유지할 때 생육이 양호하다.
- 이산화탄소(CO₂)를 사용할 때는 적정 광도 200μmol·m⁻²·s⁻¹ 이상
- 배양액농도 1.2~1.6dS·m⁻¹(여름철 1.2dS·m⁻¹, 겨울철 1.6dS·m⁻¹)
- 담액수경보다는 분무경이, 저농도보다는 고농도의 배양액이 생장을 증대시킨다.



MEMO

A large rectangular area with rounded corners, outlined in green, containing horizontal dashed lines for writing.

7 수경재배

수경재배는 뿌리를 지지하는 배지가 없는 순수수경(Water Culture)과 뿌리를 지지하는 배지가 있는 고형배지경(Substrate Culture)으로 분류한다.

순수수경은 배지를 사용하지 않고 배양액에 직접 뿌리를 노출시켜 재배하는 방식으로, 잎채소류(엽채류), 분화류(화분에 키우는 꽃 종류), 뿌리채소류(근채류), 감자 등을 재배하는데 적합하다. 고형배지경은 작물을 지지하는 배지에 배양액을 공급하면서 재배하는 방식으로 열매채소류(과채류) 재배에 적합하다.

배지는 종류에 따라 무기배지경(Inorganic Substrate Culture)과 유기배지경(Organic Substrate Culture)으로 분류한다. 무기배지경은 천연무기배지, 인공무기배지 및 유기합성배지 등 세 종류의 배지가 이용된다. 유기배지경은 <표 3-12>에서 보는 것처럼 화학적 특성이 다른 피트모스, 코코피트, 왕겨, 훈탄, 톱밥, 나무껍질(수피) 등 천연유기배지가 이용된다. 또한, 단용 배지의 물리화학적성을 개선하기 위해 몇 가지 배지를 혼합하여 사용하는 경우가 있는데, 이를 혼합배지경(Mixed Substrate)이라고 한다.

 <표 3-12> 상토 종류별 화학성(서울시립대, 1992년)

모판흙(상토)	pH (1:5)	CEC (cmol/kg)	OM (%)	Ava. P ₂ O ₅	칼륨(K)	칼슘(Ca)	마그네슘(Mg)
					(cmol/kg)		
펄라이트	6.9	0.05	0.1	1.6	0.04	0.59	0.13
질석	6.8	4.4	0	8.4	0.04	0.68	0.17
피트모스	3.9	10.3	53.4	1.8	0.02	0.15	0.14
바크	4.4	4.1	48.5	6.4	0.04	0.28	0.03
목탄	8.8	—	39.7	7.0	0.12	0.52	0.06
훈탄	7.4	—	38.0	7.5	0.18	0.54	0.07
모래	6.8	0.1	0.1	1.2	0.07	0.09	0.02
입상면	8.5	0	0	0	1%	29%	5%

순수수경

가. 담액수경(DFT, Deep Flow Technique)

담액수경은 일정 높이의 배양액에 뿌리를 담가 재배하는 방식이다. 이 방식은 배양액 안에 뿌리가 잠기기 때문에 양·수분 공급은 충분지만 뿌리로의 산소공급이 부족해지는 단점이 있다.

담액수경은 산소 공급, 급액방법, 재배 베드의 모양, 규격 등에 따라 다양하게 구분되며 배양액 탱크, 급액장치, 배액장치, 제어장치 및 재배 베드로 구성된다. 베드의 재료는 콘크리트, 합성수지, 스티로폼 등이 있으며, 폭 100cm × 깊이 15~20cm 및 길이 300cm 이내로 제작한다. 베드의 위쪽에는 스티로폼 정식판을 놓아 심는 거리(재식거리)에 맞게 아주심기(정식)할 모종의 **지제부**^{v1}를 우레탄 스펀지 등으로 감싸 심는다.

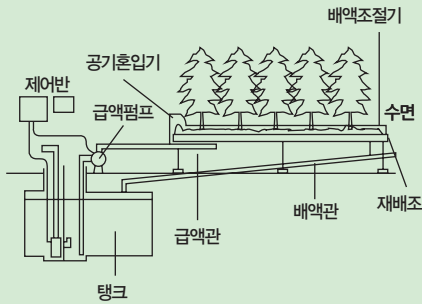
담액수경은 산소의 공급이 중요하기 때문에 일정한 간격으로 배양액을 순환시키는 순환식, 기포발생기 등을 이용하여 공기를 불어넣어 주는 통기식, 생육이 진전되어 뿌리가 길어지면 양액의 수위를 낮추어가는 액면저하식 등의 산소공급 방법이 적용되고 있다.

담액수경 방식은 베드 안의 양액량이 많아서 뿌리 주변(근권)의 온도조절이 쉽고 양액 농도 및 pH가 안정적이지만, 배양액이 많이 필요하고 청결한 재배조 관리가 어려운 단점이 있다. 담액수경은 배양액 안의 산소가 부족하기 쉽기 때문에 인위적으로 산소를 공급하거나 기포 발생기를 설치하는 것이 좋다. 또한 양액과 함께 산소를 공급하기 위해 베드와 양액탱크에 공급양액과 회수양액에 낙차를 두어 수포가 발생하게 한다. 담액수경의 장점은 베드 안의 양액량이 많기 때문에 뿌리 주변(근권)의 온도조절이 쉽고 양액 농도 및 pH가 안정적이다. 또한 배양액이 담겨 있기 때문에 일정 시간 배양액 순환이 정지되어도 식물체 손상이 적다. 그러나 작물에 공급하는 수분량을 조절하기는 어렵고 양액을 순환시키기 때문에 병원균이 침입했을 때 베드 전체로 확산되기 쉽다.

Tip.

v1 지제부

흙과 지상부의 경계부위

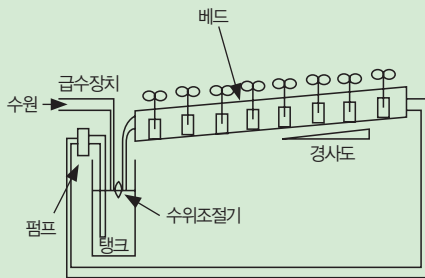


〈그림 3-49〉 담액식 수경재배

나. 박막수경(NFT, Nutrient Film Technique)

박막수경(NFT) 재배는 베드에 완만한 경사를 주어 수로와 같은 모양으로 배양액을 흘려보내는 뿌리에 양수분과 산소를 공급하는 방식이다. 이 방식은 뿌리의 일부가 공중에 노출되고 일부는 흐르는 양액에 닿아 양·수분과 산소 흡수가 원활하다.

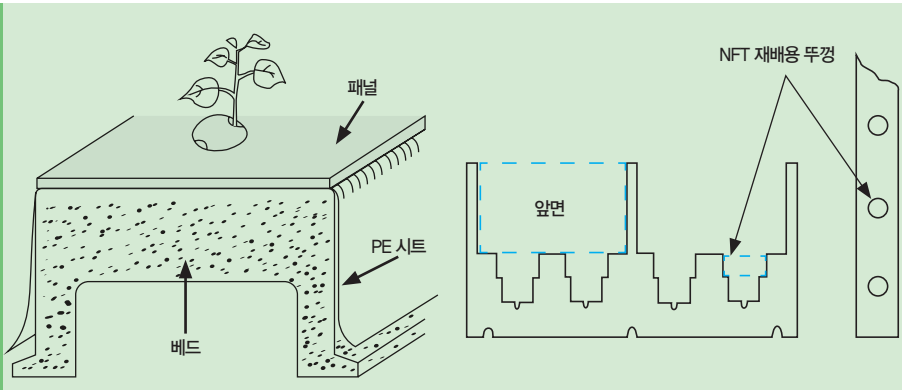
박막수경(NFT)은 설치가 간단하여 시설비가 저렴하고, 소량의 양액만이 순환되기 때문에 중량이 작아 고설식 또는 다단식으로 설치하기 적당하다. 배양액 양이 적기 때문에 온도가 높은 시기에 양액 및 뿌리 주변(근권)의 온도가 높아지기 쉬운 결점이 있다. 따라서 단열이 잘되는 재질로 베드를 만드는 것이 좋다.



〈그림 3-50〉 박막수경(NFT) 방식

베드의 높이와 모양은 작물의 종류나 작업능률 등을 고려해 결정한다. 예를 들어, 토마토 재배를 위해서는 지면경사를 1/25~1/125로 만든다. 지면에 필름을 깔고 모종

(묘)을 중앙에 배치하고, 폭을 30cm 이상으로 유지하며 필름을 양쪽에서 모아 집계 등으로 고정시킨다. 최근에는 시중에 판매하는 성형배지를 이용하여 지면을 대신하거나 일정 높이의 재배상을 만들어 재배하기도 한다. <그림 3-51>



스티로폼 성형 박막수경(NFT) 배지

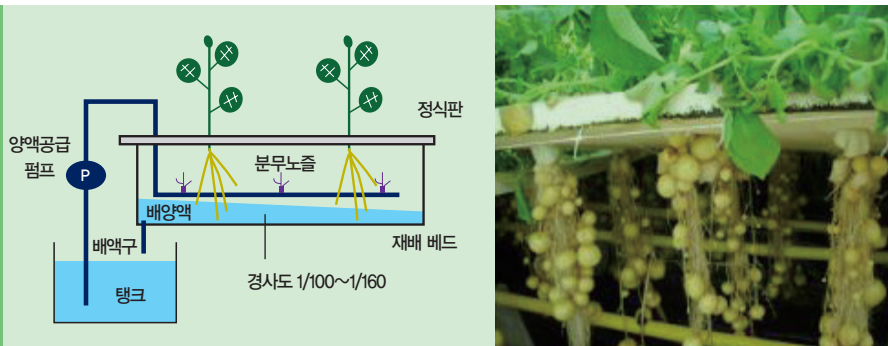
암면재배 겸용 박막수경(NFT) 배지

<그림 3-51> 스티로폼 성형 박막수경(NFT) 배지

다. 분무경

분무경(Aeroponics)은 배양액을 작물의 뿌리에 2~3분마다 수초씩 뿌려서 재배하는 방식으로, 분무시간과 분무간격을 적절하게 조절하여 생육상태의 조절도 어느 정도 가능하다. 베드 안에 급액배관과 분무노즐을 설치해 뿌리에 배양액을 간헐적으로 뿌리기 때문에 뿌리 주변(근권)의 산소부족이 발생하지 않는다.

분무경 방식은 베드 안의 온도 즉, 뿌리에 접촉된 공기온도와 습도가 외부환경에 큰 영향을 받고 장치가 고장 나거나 노즐이 막히면 뿌리가 손상 받을 우려가 있다. 이에 노즐의 관리에 세심한 주의가 필요하다.



〈그림 3-52〉 분무경 구조 및 재배(출처 : 돛골농원 다음블로그)

배지경

순수수경 방식은 주로 잎채소류(엽채류)와 같이 재배기간이 짧은 작물의 재배에 이용되는 데 반해 배지경은 재배기간이 길고 생식생장을 유도하여 과일이나 꽃을 생산하는 열매채소류(과채류)나 장미 등의 작물을 재배할 때 이용한다. 그러나 재배가 끝나면 버려지는 배지(폐배지)가 발생하기 때문에 인공광 식물공장에서는 이용하지 않고 있다.

가. 암면(Rock Wool)경

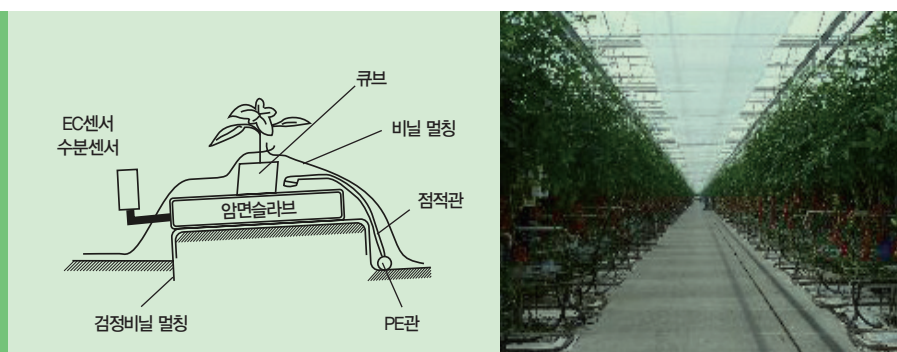
암면은 전 세계 수경재배 농가에 가장 보편적으로 보급되어 있는 배지이다. 우리나라는 1985년부터 농업용 암면 개발로 인해 재배면적이 증가했고, 과거 가장 안정적인 무기배지로 주목받았다. 암면은 암석인 안산암, 현무암, 백무암, 코크스를 혼합하여 1,600℃의 온도에서 섬유(1~8μm)로 만든 것이다. 암면은 높은 온도에서 만드는 제품이므로 무균이며 비활성물질이라 양액을 거의 흡착하지 않고 재배 중 변형이 거의 없다. 양수분의 조절이 쉬워 작물의 안정적 생산이 가능하지만, 재배 후에도 분해되지 않는 특성 때문에 폐배지의 처리가 문제시된다.

암면은 재배용으로 암석판(Slab), 입상면(Granule)이 있고 모종 기르는 용도(육묘용)로 다양한 크기의 블록과 큐브가 있다. 암면의 물리성은 밀도 80kg/m³, 고체부분(고상) 3%, 공극량(일정한 부피 속에 물과 공기로 채워진 부피의 양) 97%이다. 암면의 화학조성은 재료에 따라 차이는 있으나 이산화규소(SiO₂)가 16%, 산화알루미늄(Al₂O₃)

14%, 산화철(Fe_2O_3) 8% 등이다.

재배시설은 암면의 재배 베드, 양액 공급장치 및 양액탱크 등으로 구성된다. 베드용 암면 슬라브의 규격은 두께 7.5cm×폭 20~30cm×길이 100cm 정도가 좋다. 3.2m 폭 벤로형 온실의 경우에는 보통 2줄로 심는다. 베드를 설치할 때는 땅 표면을 평평하게 고른 다음, 10cm 높이로 스티로폼이나 벽돌을 깔거나 암면재배용 성형 베드를 놓고 그 위에 암면 슬라브를 배치한다. 이때 슬라브를 왼쪽이나 오른쪽으로, 즉 배수로가 있는 쪽으로 약간의 경사를 두어 물빠짐이 잘되게 한다. 암면 슬라브를 설치할 때 온도가 낮은 지역에서는 암면 슬라브 밑에 온탕 가온용의 엑셀 파이프를 깔기도 한다. 암면 슬라브를 설치한 후 방울물주기(점적관수) 장치를 설치하고 염화비닐(PVC) 파이프에 구멍을 뚫는다. 양액 공급주관의 지름은 베드의 길이에 따라 13~25mm로 한다.

〈그림 3-53〉



〈그림 3-53〉 암면경 구조 및 재배

나. 펄라이트(Perlite)경

농업에 사용하는 펄라이트는 규산질이 많은 산성화산암의 일종인 진주암을 1,000℃ 이상으로 가열하여 팽창시킨 물질로, 통기성과 물을 통과시키는 투수성이 뛰어나다. 펄라이트는 〈표 3-13〉에서 보는 것처럼 다른 배지와 달리 가비중이 0.2g/cm³ 이하로 가벼워 취급하기 쉽다. 펄라이트는 높은 온도에서 구운 무균, 무취, 무독성 배지로, 개방 세포 구조를 하고 있다. 배지 무게의 3~4배의 물을 흡착하므로 수분흡수력이 뛰어나다. 배지의 pH는 6.8~8이며 양이온 치환능력은 0.15me/100cc로 완충력(외부의 작용으로부터 현상을 유지하려고 버티는 힘)이 없고 무기영양소를 함유하고 있지 않다.



〈표 3-13〉 펠라이트 입자 크기에 따른 물리성

구 분	입자 크기		
	2.5~5mm	1.2~2.5mm	1.2mm 이하
가비중(g/cm ³)	0.23	0.12	0.04
공극률(%)	77.3	81.6	92.9

펠라이트는 공극률^{v1}이 높아 통기성은 좋으나 유효수분 함량이 낮기 때문에 입상암면, 훈탄, 피트모스 같은 배지와 함께 사용하는 경우도 있다. 베드의 구조는 폭 30cm × 깊이 20cm × 길이 120cm 정도가 좋으며 바닥에 양액을 배출(배액)하기 위한 홈이 있는 것을 사용하면 좋다. 〈그림 3-54〉

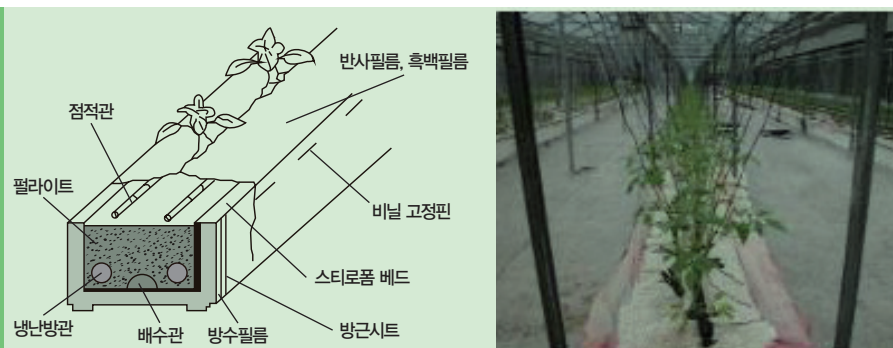
베드 설치시 배액구 쪽을 낮게 하여 경사를 주어 양액의 배출이 잘되도록 한다. 베드 바깥쪽의 밑면과 옆면에 두께 0.1mm의 흑백필름을 깔아서 양액이 새지 않도록 한다. 펠라이트는 입자의 크기를 구분하지 않고 혼합되어 있는 배지를 사용하는 경우가 많다. 그러나 가능하면 펠라이트의 입자크기를 고려해 큰 입자는 아래에, 작은 입자는 위층에 채워서 사용하는 것이 좋다.

베드의 온도를 높이기 위해서는 배지를 1/4정도 채운 다음 직경 13mm 폴리에틸렌(PE) 파이프를 2가닥 설치하고 베드의 나머지 3/4 부분을 다시 배지로 채운다. 배지 위에 두께 0.1mm 흑백필름을 덮고 벗겨지지 않도록 고정시킨다. 펠라이트 재배는 양이온 치환능력이 낮아 양분을 거의 흡착하지 않으므로 양분관리가 쉽고 암면보다 폐기가 쉽다.

Tip.

v1 공극률

전체 중에서 고형입자가 차지하고 있지 않은 부분의 비율



〈그림 3-54〉 플라이트 재배 구조 및 베드

다. 코이어(코코피트)경

코이어(Coир)는 코코넛 과일껍질의 섬유질을 뽑아내는 과정에서 생기는 섬유질 가루로, Cir Fibre, Pith, Coir Dust라고 한다. 코이어는 스리랑카를 비롯한 인도, 동남아시아 등에서 수입하여 사용한다. pH는 중성에 가깝고 비교적 물리적 특성이 우수하여 압면 대체물로 코이어를 이용하는 농가가 최근 증가하고 있다. 그러나 유기배지이기 때문에 생산방법, 생산시기에 따라서 화학적 특성이 달라 배지로 이용하기 위해서는 균일한 화학성을 유지하는 전처리 과정이 필요하다. 전처리가 되지 않은 배지는 질소와 칼슘이 거의 없거나 낮고, 염소, 나트륨, 칼륨 농도가 비정상적으로 높아 염류장해를 유발할 위험이 있어 초기 생육이 억제될 수 있다.

병해충 방제

자연광 또는 인공광 식물공장에서 재배하는 잎채소류(엽채류)에서 발생하기 쉬운 대표적인 병해는 무름병, 노균병, 균핵병, 잿빛곰팡이병, 밑둥썩음병 및 시들음병이다. 또한, 모자이크병과 같은 바이러스에 의해 식물체 위축되거나 뒤틀리는 현상이나 황반병(황색 반점이 생기는 병)이 발생한다.

봄에는 진딧물류가 주로 발생하는데, 시기별로는 5~6월에 많이 발생한다. 여름에는 나방과 나비의 애벌레가 발생하는데, 주로 배추과 작물에 큰 피해를 준다. 피해 해충으로는 배추좀나방, 배추순나방, 파밤나방, 벼룩잎벌레, 총채벌레 등이 대표적이다.



〈그림 3-55〉쌈채소를 가해하는 진딧물류



〈그림 3-56〉배추좀나방 피해

특히 배추좀나방은 작물을 먹어치우는 섭식력이 강하지 않지만 생장점에 피해를 주기 때문에 초기 발생 시에 방제해야 한다.

충채벌레는 날개모양이 충채(먼지털이)모양을 닮아서 붙여진 이름이다. 곤충 가운데

가장 작은 부류에 속하는 것으로서 대부분 0.5~3mm 정도이고, 작은 털의 테두리가 있고 좁은 날개를 가지고 있는 것이 특징이다. 총채벌레에는 꽃노랑총채벌레, 오이총채벌레, 파총채벌레 등이 있다. 오이총채벌레의 경우 어른벌레(성충)는 주로 식물체의 과경, 꽃받침, 잎맥(엽맥), 잎자루(엽병), 잎살(엽육) 등의 조직 내에 1개씩 날개로 알을 낳으며 한 마리 어른벌레(성충)가 약 100개를 알을 낳는다. 알 기간은 4~5일로 부화한 애벌레(유충)가 2령을 지나 다 자란 애벌레(유충)가 되면 땅 표면으로 떨어져 2~3cm 깊이의 땅속이나 낙엽 밑, 비닐 밑 등에서 제 1, 2번데기가 된 후 어른벌레(성충)가 된다. 1세대를 경과하는데 25℃에서 14~18일 걸리고, 시설 안에서는 연간 15세대 이상 발생한다. 발육 한계온도는 11~12℃이다.

꽃노랑총채벌레는 황색이나 청색의 점착트랩을 군데군데 걸어두고 어른벌레(성충)를 잡는 것도 방제법 중 하나이다.



〈그림 3-57〉 오이총채벌레



3장 자연광 식물공장

1. 종류와 특징

- ▶ 자연광 식물공장은 주로 태양광을 이용해 작물을 재배하고, 온도가 높을 때는 빛을 차단하며 냉방을 실시한다.
- ▶ 단위면적당 초기 투자비용이 적고 대규모로 공장을 건설하기가 비교적 쉽다. 빛을 보충하는데 인공광원을 사용하며 소비전력은 인공광 식물공장보다 낮다.
- ▶ 자연광 식물공장은 지붕의 모양에 따라 양지붕형, 벨로형, 아치형 등으로 구분하고, 동 형식에 따라 단동과 연동으로 분류한다.
- ▶ 자연광 식물공장은 덮는 자재(피복재)를 설치하는데 재배 작물이 무엇인지, 재배시기에 언제인지 등을 따져 작물에 적합한 종류를 선택해야 한다. 특히 사용할 수 있는 햇수가 길고 가격이 저렴한 자재를 고르도록 한다.

2. 광원

- ▶ 비가 오거나 흐린 날 등 빛 보충이 필요할 때는 고압 나트륨램프나 메탈할라이드램프 등을 사용한다. 빛의 강도(광강도)는 어느 정도 제어할 수 있지만 인공광 식물공장에 비해 제어 정밀도는 떨어진다.
- ▶ 인공광원으로 빛을 보충할 때는 생육 촉진, 기능성성분 증가 등 사용 목적을 분명히 하고, 소규모 시험재배를 한 후 도입하도록 한다.

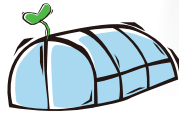
3. 냉·난방

- ▶ 난방은 온풍 난방기와 온수 보일러를 이용하며 최근에는 투입되는 에너지보다 훨씬 더 많은 에너지를 공급하는 히트펌프가 도입되고 있다.
- ▶ 냉방은 식물공장 내부의 기온상승을 막기 위해 기계적 냉각방식과 수분증발을 이용한 증발냉각 방식을 이용한다.

4. 자동화

- ▶ 대규모 식물공장은 자동화 기계장치의 도입이 필요하며, 이때 규모, 작업여건, 경제

핵심만 꼭! 꼭!



성을 고려한다.

- ▶ 모종흙(상토) 충전기, 파종기, 발아장치(발아실) 등 재배공정에 따라 다양한 자동화시스템이 요구된다.
- ▶ 간격조절장치(러그식, 캄식, 스쿼류식, 갠트리식 등)는 아주심기 단계에서 수확 단계로 재배 홈통을 이동시키면서 작물 사이의 간격을 조절하는 장치이다.
- ▶ 자연광 식물공장은 외부 기상에 따라 내부환경 변화가 크기 때문에 별도의 발아, 육묘시설을 갖추는 것이 좋다.

5. 환경제어

- ▶ 환경제어 요인에는 냉·난방 제어, 스크린, 유동팬, 물주기, 전기조명, 빛 보충 등이 있다.
- ▶ 환경제어장치는 내·외부 기상 센서, 제어기(PLC, 마이크로 컨트롤러 등) 등으로 구성된다.
- ▶ 자연광 식물공장에 적용되는 제어시스템은 제어요소가 많고 제어논리 또한 복잡하다.

6. 수경재배

- ▶ 자연광 식물공장 수경재배는 배지가 없는 순수수경과 뿌리를 지지하는 배지가 있는 고정지배형으로 분류한다.
- ▶ 순수수경은 배지 없이 배양액에 직접 뿌리를 노출시켜 재배하는 방식으로 잎채소류, 분화류, 뿌리채소류, 감자 등의 재배에 적합하다.
- ▶ 고정배지경은 작물을 지지하는 배지에 배양액을 공급하면서 재배하는 방식으로, 열매채소류(과채류) 재배에 적합하다.
- ▶ 식물공장에서 재배하는 잎채소류에는 무름병, 노균병, 균핵병, 잣빛곰팡이병, 밑동썩음병, 시들음병을 비롯한 병해와 총채벌레, 배추좀나방, 파밤나방, 진딧물 충해가 발생하기 쉬워 주의를 기울여야 한다.

제4장

식물공장 사례



1. 국내
2. 국외



새로운 식물생산시스템인 식물공장을 운영해 작물을 생산, 판매하고 있는 우리나라와 해외의 사례를 소개한다. 특히 해외의 식물공장은 1950년대 이후 발전한 유럽과 미국, 일본을 중심으로 연구개발 및 보급이 이뤄지고 있다. 일본의 경우에는 지역 일자리 창출을 목적으로 식물공장을 운영하는 사례도 증가하고 있다.

1 국내

베지텍스 일산팜(영농회사)

- 위치 : 경기도 고양시
- 규모 : 패널 조립식 건물, 약 600m²
- 광원 : 3파장 형광등
- 재배 베드 : 박막수경(NFT) 8단(폭 1.5m × 길이 12m × 높이 4m)
- 재배작물 : 청치마상추, 웨이브 양상추, 비타민 등
- 특징
 - 재배상은 원통형 재배홈통을 길이 방향으로 3라인, 프레임을 중심으로 좌우 2열 배치
 - 재배홈통을 덮는 재식판으로 염화비닐(PVC)판을 이용
 - 형광등에 반사 튜브를 씌워 광효율을 높임
 - 공기와 열분배를 위한 공조덕트는 베드 사이에 설치
 - 재식판을 로프로 끌어당겨 한쪽에서 수확하는 방식
 - 주 5회 1일당 80g 단위 500봉지 수확



카스트친환경농업기술(LED 광원업체)

- 위치 : 경상북도 구미시
- 규모 : 패널 조립식 건물, 약 132m²
- 광원 : LED(면적 352m²에 1만 4,688개 설치)
- 재배 베드 : 박막수경(NFT) 8단(폭 1.2m × 길이 9m × 높이 4m)
- 재배작물 : 청축면상추, 청경채 등 잎채소류(엽채류)
- 특징
 - 재배상은 스티로폼 베드와 스티로폼 재식판
 - 주간 24℃ 이하, 야간 여름 22℃, 겨울 16~18℃로 관리
 - 액화 이산화탄소(CO₂)를 이용(이산화탄소(CO₂) 농도를 800~900ppm으로 유지)
 - 포기 수확으로 연간 26.2톤 정도 생산
 - 가정용 소형, 컨테이너형, 중형, 대형 식물공장 시스템 개발
 - 경상북도농업기술원, 대구농업기술센터 등에 식물공장 설치



외관



내부

태연친환경농업기술

- 위치 : 서울특별시 금천구
- 규모 : 빌딩 안에 설치, 재배실 면적 165㎡(전체 면적 330㎡)
- 광원 : HEFL(외부전극형광등)
- 재배 베드 : 박막수경(NFT) 5단(ABS 수지로 제작)
- 재배작물 : 아이스플랜트
- 특징
 - 재배상은 스티로폼 재식판에 얇은 알루미늄 막을 씌워 사용
 - 외기 유입 없이 항온항습기로 온·습도를 조절
 - 액화 이산화탄소(CO₂)를 이용(이산화탄소(CO₂) 농도는 1,200ppm으로 유지)
 - 일본의 Advanced agri에서 기술지원 및 배양액, 씨앗, 스펀지 등 자재 사용
 - 온실용 시설자재 사업, 식물공장(가정용, 업소용 등) 사업
 - 아이스플랜트의 브랜드화(Crispy) - 호텔 등에 납품 및 Crispy 프랜차이즈 사업



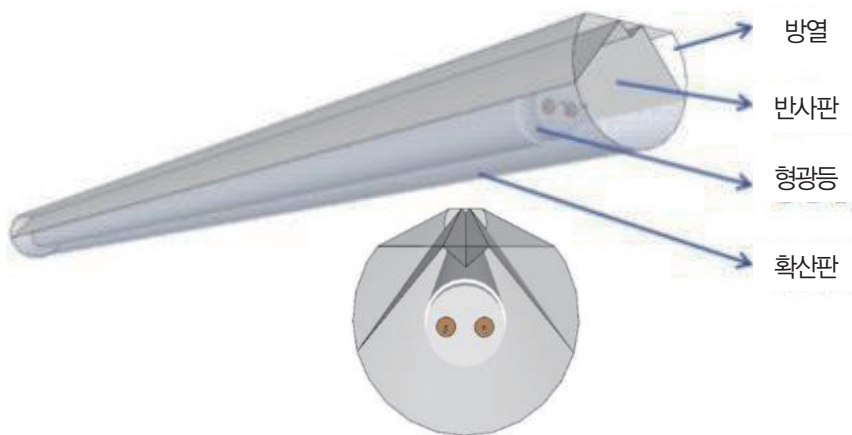
재배실



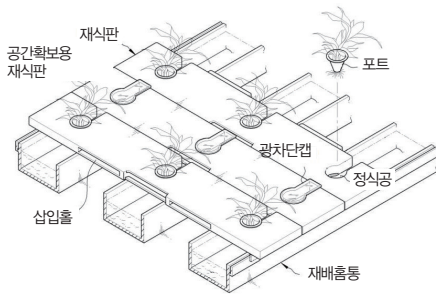
기계실

인성테크

- 위치 : 경기도 용인시
- 규모 : 상가 건물에 설치, 재배실 면적 145㎡(전체 면적 165㎡)
- 광원 : 형광등
- 재배 베드 : 박막수경(NFT) 5단 2열 - 자형 알루미늄 재배함통 설치
- 재배작물 : 로메인, 콜로로사, 비타민, 바실 등 수입 샐러드류
- 특징
 - 재배상은 작물을 심는 재배판과 공간확보용 재배판을 사용
 - 식물공장용 형광등 개발
 - 방열부, 반사판, 확산판이 조합된 원통형의 구조로 그 내부에 형광등을 삽입
→ 반사판에 의해 형광등의 빛을 반사함으로써 빛 쏙임(광조사) 효율을 높이고, 밀폐된 등기구에 외기를 통과시켜 광원에서 발생하는 열을 외부로 배출해 냉방부하를 줄임
 - 에어컨으로 20~24℃ 범위 관리
 - 액화 이산화탄소(CO₂)를 이용(이산화탄소(CO₂) 농도는 600~800ppm으로 유지)
 - 식물공장 시스템의 브랜드화(City farm), 신세계백화점 등에 설치



식물공장용 형광등



재배 베드



재배실



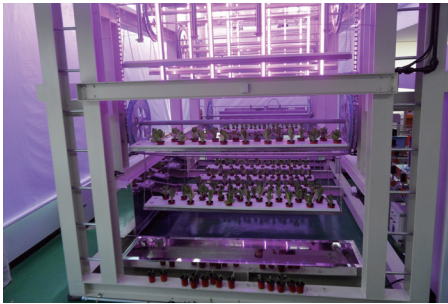
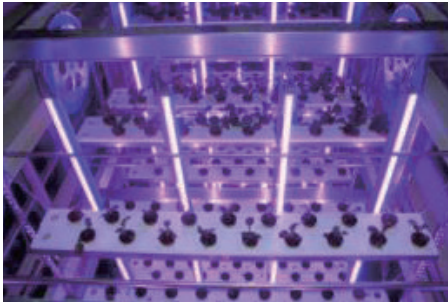
모듈형

농촌진흥청 국립농업과학원(연구용 식물공장)

- 위치 : 경기도 수원시
- 규모 :
 - 인공광 식물공장 - 철근 콘크리트 구조
(지하 1층, 지상 3층, 높이 10m, 연면적 396㎡)
 - 자연광 식물공장 - 양지붕형 유리온실
(높이 10m, 연면적 50㎡, 전체 연면적 446㎡)
- 광원 :
 - 인공광 식물공장 - LED와 형광등
 - 자연광 식물공장 - 태양광과 LED
- 재배작물 : 적축면상추, 청치마상추, 로메인 등 잎채소류(엽채류) 재배
- 특징
 - 1층과 유리온실 - 씨뿌리기부터 거두기까지 공정의 자동화 장치, 수직 이송재배시스템을 설치(포트 공급, 모판흡(상토) 충전, 씨앗 심을 구멍 뚫기(혈공), 씨뿌리기 일관시스템, 발아기(싹틔우는 기계), 녹화기, 옮겨심기(이식) 로봇 등)
 - 2층 - 6단 3열, 3층 - 2단 이동 재배시스템 설치
 - 6만 Kcal/h 용량의 지열 냉·난방 히트펌프 설치
 - 재배환경(온·습도, 이산화탄소(CO₂), 양액, 광원 등)은 인터넷과 스마트폰을 이용하여 원격 모니터링 및 제어가 가능
 - 아주심은(정식) 후 4주 동안 재배 후 수확
(씨뿌리기, 모종 기르는 기간을 포함할 경우 7~8주면 거두기 가능)



식물공장 연구동 전경



수직형 재배시스템



수평 다단 재배시스템

국내 식물공장 업체 현황

산업체	현황
리프레시 함양	○ 산업체 특징 : 두원산업개발이 설립한 영농법인 ○ 기술개발 현황 : 수경재배가 아닌 화분 토양재배로 생산하는 시스템 개발, 작물개발은 잎채소류(엽채류), 허브, 버섯 등, 화분으로 뿌리 채소류(근채류) 재배 ○ 사업현황 : 동형 식물공장 운영, 잎채소류(엽채류), 허브, 버섯 사업화 ○ 식물공장 설치현황 : 경상남도 함양군 3,751㎡ 부지에 연면적 169㎡ 10동 설치
참농원	○ 산업체 특징 : 식물공장 설계 및 시공 전문업체 ○ 기술개발 현황 : 해양심층수 이용 작물재배 연구, 설치비를 40%까지 낮춘 저비용 보급형 식물공장 개발 중, 조류 생산 바이오매스 기술개발 중 ○ 사업현황 : 동해안 해저 200m 해양심층수 사용 ○ 식물공장 설치현황 : 강원도 고성군 경동대학교 창업보육센터에 5단 3조(4.8m × 1.2m) 식물공장 2개 시스템 설치
태연 친환경 농업기술	○ 산업체 특징 : 시설자재업체에서 영농, 식물공장시스템 사업으로 확대 ○ 기술개발 현황 : 자체 식물공장 시스템 개발, 일본 어드밴스드 어그리사에서 아이스플랜트 재배기술 도입 ○ 사업현황 : 온실용 시설자재 식물공장사업으로 가정용에서 업소용까지 사업 추진 중, 아이스플랜트를 재배해 호텔 등에 납품 ○ 식물공장 운영 : 서울시 금천구 가산디지털단지 안에 30㎡, 50개 트레이 규모
NBM	○ 업체특징 : 2007년 설립된 바이오벤처기업 ○ 기술개발 현황 : 식물 내 면역단백질 생산기술, GM(Genetically Modified) 작물(생명공학기술을 이용해 원래의 유전자를 인위적으로 조작한 작물) 개발 등 분자농업 기술개발에 집중, 다양한 잎채소류(엽채류) 재배기술 개발 ○ 사업현황 : 기술개발 위주로 잎채소류(엽채류) 재배보다 면역단백질 발현 식물 개발 등 분자농업 중심, 조류 생산용 LED 배양기 개발, 기능성물질 생산을 위한 식물공장 사업 추진 중 ○ 식물공장 운영 : 전라북도 전주시 2,973㎡ 규모 설치 추진 중

산업체	현 황
에코스프 라우트	○ 산업체 특징 : 기타 과일, 채소 가공 및 저장처리업 ○ 사업현황 : 수경재배 + LED 빛 보충(보광)을 통해 새싹채소 재배사업
베지텍스	○ 산업체 특징 : 표준화된 설비자재로 형광등을 이용한 식물공장 구축 ○ 기술개발 현황 : 일본 페어리플랜트테크놀로지사 형태의 실용적인 시스템 구축, 공조설비로 에너지 절감 및 실내 균일한 재배환경 유지 ○ 사업현황 : 590㎡(180평) 규모 식물공장에서는 상추류 생산, 판매 ○ 식물공장 설치현황 : 1,900포기/일 생산 가능(60~80g/포기 기준) 재배기간 38일(씨를 뿌린 10일 후 옮겨심기(이식), 14일 후 아주 심기(정식), 14일 후 수확)
태종 씨앤아이	○ 산업체 특징 : 종합 건설업체가 모체, 시스템 설계, 시공업체로서 LED 광조절장치 사업화 ○ 기술 개발현황 : 소형 식물공장 모듈화, 업소용, 농업용 식물공장 개발 ○ 사업현황 : 광연구소 설립 식물공장 사업 시작, LED 식물공장 추진 ○ 식물공장 설치현황 : 광주에 오토팜 식물공장(4층 건물, 재배단지, 연구소, 카페, 사무실로 구성) 면적은 165㎡ 규모, 6단 재배
인성테크	○ 산업체 특징 : 셀프세차기, 진공청소기, 매트세척기, 고압세척기 제조 ○ 기술개발 현황 : LED를 광원발열에너지회수시스템 PFFL(Plant Factory Fluorescen)로 변경, 설치비 절감 식물공장 개발 ○ 사업현황 : 2004년 시작해 2009년 국내 최초로 시스템 개발을 완료, 식물공장시스템 사업과 영농법인을 통해 작물 재배 연계사업 추진 중 ○ 식물공장 설치현황 : 경기도 용인시 죽전 본사 165㎡, 남사공장 165㎡ ○ 재배작물 : 상추, 치커리, 케일 등 잎채소류(엽채류) 생산(식당운영, 백화점 납품)
카스트 친환경 농업기술	○ 산업체 특징 : LED생산업체로 제어장치 개발에서 식물공장으로 확장 ○ 기술개발 현황 : 가정용 소형 식물공장, 딸기 및 토마토 재배기술 개발 ○ 사업현황 : 식물공장 규모별 모듈화를 통해 가정용 소형 식물공장, 업소용, 농업용, 대형 식물공장까지 설계 및 설치 추진, 구미공장에서 상추와 어린잎 채소를 생산 인터넷, 대형마트에서 판매 ○ 식물공장 설치현황 : 경상북도 구미시 132㎡

2 국외

일본

가. TS팜

- 위치 : 후쿠이현 등(1999년까지 12곳이 보급·가동 중)
- 규모 : 약 400m²
- 광원 : 고압 나트륨램프(960W)
- 생산량 : 하루 1,700포기
- 재배작물 : 리프 양상추, 프릴 양상추 등의 샐러드용 야채
- 특징
 - 재배의 면적 이용효율성이 좋은 V자 형태로 배치하고, 포기 사이 간격(주간) 조절이 가능한 분무수경 재배 방식을 채택
 - 씨앗은 직접 뿌리고(직파), 거두기는 재배 패널째 수확 후 뿌리를 절단
 - 재배 패널의 뒷면으로 뿌리에 직접 양액을 뿌림 - 뿌리가 필요한 산소는 공기로 부터 흡수(양액의 용존산소 부족 걱정 없음), 적은 수량 재배 가능
 - 식물육성용 고압 나트륨램프의 균일한 광분포를 위해 라인별로 조명시간과 밝기를 바꿀 수 있으며, 작물에 따라 최적의 빛 조건을 설정
 - 씨뿌리기에서 재배까지 약 30일이 소요됨.

나. 오즈산업 식물공장

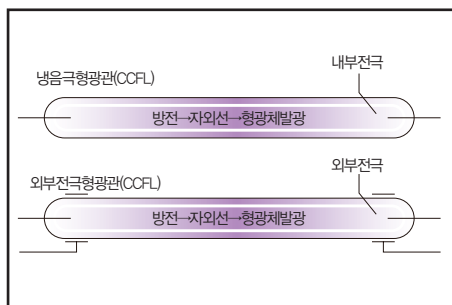
- 위치 : 도쿄 코다이라시
- 규모 : 약 450m²(약 136평)
- 광원 : 형광등

- 재배작물 : 양상추(사라다나), 로메인, 바실, 로즈마리 등
- 생산량 : 1일 평균 660포기
- 재배방식 : 7~9단의 다단식·박막수경(NFT) 순환
- 특징
 - 씨뿌리기, 모종 기르기, 재배가 동시에 이루어지며, 씨뿌리기부터 거두기까지는 약 40일이 소요됨.
 - 일반 수경재배 채소와 같은 가격대인 1kg 기준 약 1,000엔 정도로, 모두 레스토랑, 백화점에 유통, 판매
 - 식물공장에서 생산한 채소는 세균 없이 포장해 일반 재배에 비해 10~15일 정도로 길며 채소 내 유효성분 함량 증가
 - 1일 평균 상주인원이 10~13명으로, 식물공장 내부 재배시스템을 제외하고는 대부분이 수작업에 의존

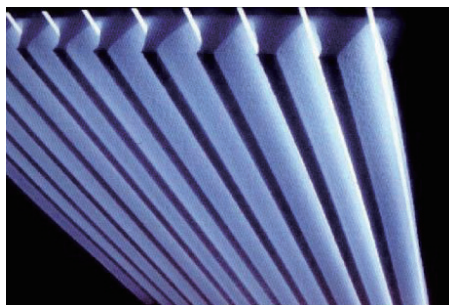
다. 어드밴스드 어그리(Advanced agri.)

- 위치 : 시가현 나가하마시
- 규모 : 약 450m²(약 136평)
- 광원 : HEFL(외부전극형광등)
- 재배작물 : 양상추(사라다나), 로메인, 바실, 로즈마리, 아이스플랜트 등
- 생산량 : 1일 평균 660포기
- 재배방식 : 7~9단의 다단식·박막수경(NFT)
- 특징
 - 액정 텔레비전용 배경조명(Back Light)의 기술을 응용, 식물공장용 조명장치인 박형 HEFL 조명시스템 개발
 - HEFL 조명시스템의 관 직경은 3.4mm와 4.0mm, 관 길이는 표준 860mm로 420~1,200mm의 범위에서 선택이 가능
 - 전등(8개)의 900mm × 700mm × 57mm의 무게는 약 6kg 정도
 - 포물선형상의 반사판을 사용하면 같은 평면에 균일한 광량을 얻을 수 있으며, 14개의 등이 설치된 조명시스템의 경우 반사판 바로 아래에서 광량자속밀도는 $260\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 5cm 거리에서는 $190\sim 200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이 얻어짐.

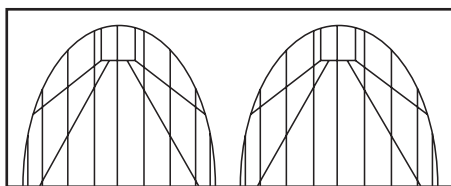
- 아이스플랜트의 경우 씨뿌리기부터 거두기까지 50~70일이 걸림. 비닐하우스 재배보다 20~30% 생육기간이 줄어들고 여름재배도 가능함.
- 브랜드화해 1일 1,100포기를 슈퍼마켓, 백화점, 음식점 등에 판매, 식물공장 도입을 검토하고 있는 기업 등에 재배 노하우와 재배 장치 판매
- 잎채소류(엽채류)보다 영양가가 높은 기능성채소를 중심으로 연구·개발



구조



HEFL 모습



HEFL 반사판 구조

라. 알루미스(Alumis - 알루미늄 취급 회사)

- 위치 : 사카현 사카시
- 규모 : 약 200m²
- 광원 : 형광등
- 재배작물 : 프리ل 양상추, 썬니 양상추, 싹상추, 미니 셀러리, 다홍채, 쇠비름 등 ● 생
산량 : 1일 평균 660포기
- 재배방식 : 6단 × 20대의 다단방식으로 선반 위치변경이 가능하도록
삽입식으로 제작, 청소가 용이한 탈착식(탈부착이 가능한) 재배 트레이

● 특징

- 폐교 내에 재배실, 육묘실, 출하실, 조명, 공조와 양액공급 장치 등 일련의 설비를 갖춘 식물공장시스템 야사이노 키모치(野菜のKIMOCHI) 개발(약 1,400만 엔)
- 형광등을 먼지가 날리는 것을 방지하는 비산방지 덮개로 덮어 사용, 높이조정 가능
- 공조는 환기팬으로 환기, 에어컨으로 실내온도 조절



알루미스(Alumis) 재배 베드

마. 미쓰비시(三菱)화학

- 규모 : 약 40ft(피트), 길이 12.2m × 폭 2.4m × 높이 2.9m의 컨테이너형
- 광원 : LED + 형광등
- 가격 : 1기당 최저 5000만 엔 정도 (태양전지 + 리튬이온 이차 전지 = 6,000~7,000만 엔 정도)
- 재배작물 : 상추 등의 잎채소류(엽채류)
- 생산량 : 1포기 70~100g(재배기간 30일), 1일 약 50포기 이상 수확
- 재배방식 : 컨테이너 양측으로 4단×2
- 특징
 - 컨테이너의 수송과 설치가 쉬움.

- 컨테이너 내 물주기(관수), 공조장치, 온도유지 위한 단열재 사용
- 물을 순환·여과해 재이용
- 컨테이너 외부에 태양전지 패널을 설치하여 조명전원으로 사용



컨테이너 식물공장(왼쪽 내부, 오른쪽 외부)

바. 가태채원(加太採園)과 향탄채원(響灘採園) - (주)카고메

- 위치 및 규모
 - 가태채원 : 와카야마현 와카야마시, 5만 2,000㎡
 - 향탄채원 : 후쿠오카현 기타큐슈시, 8만 4,000㎡
- 광원 : 태양광(자연광 식물공장)
- 재배작물 : 토마토
- 생산량
 - 가태채원 : 연간 1,500톤(9월부터 다음해 7월까지 수확)
 - 향탄채원 : 연간 2,000톤(9월부터 다음해 7월까지 수확)
- 특징
 - 일본 최대의 토마토 생산을 하는 자연광 식물공장
 - 브랜드화해 전국 슈퍼마켓에 판매
 - 지방자치단체와 협력 → 행정적 업무와 수속 등을 진행

- 가태채원은 칸사이 국제공항 용지의 매립용 토사를 채취 후 정비된 공업단지에 건축
- 향탄채원은 석탄 발전의 실증, 실험을 하기 위한 땅을 매립 후 공업용지에 건축
- 설비와 관리용 소프트웨어는 네덜란드 기업으로부터 도입
- 네덜란드 키트(Kit) 형태의 설비장비를 채용하여 조립이 쉽고 저렴한 비용으로 짧은 기간에 시공 가능
- 공장 지붕에 태양전지 패널을 설치하여 발전된 전력을 활용해 전기를 절약하는 효과가 있음.



가태채원 내부



향탄채원 외부

사. 구주고원 야채공방(久住高原 野菜工房)

- 위치 : 오이타현 타케타시
- 규모 : 3,300m²
- 건설비 : 약 5억 엔(자본 2억 엔+사업보조비 3억 엔)
- 건설기간 : 8개월
- 광원 : 태양광 + 인공광(자연광 병용형)
- 재배작물 : 이탈리아안 파슬리, 샐러드 파슬리, 바실, 허브 등
- 생산량 : 연간 10회전, 144톤(120만 포트)
- 재배방식 : 박막수경(NFT)
- 특징
 - 일본 최초로 스웨덴의 스웨데포닉사의 시스템 도입

- 식물의 성장에 따라 라인의 폭이 이동하면서 넓어짐.
- 태양광, 인공광, 온도, 습도, 이산화탄소(CO₂), 소양액 관리 등을 컴퓨터에 의해 자동으로 조절
- 포트 형태로 수확된 채소는 상자에 넣어 트럭이나 항공을 이용해 다음날 오전에 전국의 백화점, 슈퍼마켓에 판매
- 병해충을 방지하기 위해 관리동과 재배동을 분리
- 장갑, 앞치마, 신발 등은 위생 관리된 것을 사용하고, 한번 사용한 것은 열탕 소독함.

일본의 식물공장 업체 현황



업체명	설치 연도	주요품목	면적 (㎡)	생산량 (톤/년)	인력 (명)	사업현황
사회복지법인 큐피드·페어	2003년	리프 양상추	596	37~55	7	○ 장애인 고용 목적으로 설립 ○ 지역 레스토랑, 슈퍼 대상 판매(연매출 1~1.5억 엔) ○ 리프 양상추를 70g에 198엔에 판매 중 ○ 최근 지역 학교급식 납품에 집중
야채공방	2008년	리프 양상추	-	26~28	6	○ 지역 노인과 장애인의 고용을 위해 설립 ○ 설치비 절감을 위해 일반 형광등 사용 ○ '사라다 데뷔' 브랜드로 판매 중(연매출 8,000만 엔 수준) ○ 칼슘 고품유 채소 개발
그린 플레이어 고코점	2006년	양상추, 상추 그린리프, 바실, 파슬리	200	8.5	-	○ 같은 건물에 생산공장과 판매점포를 운영 → 야채 생산과 점포판매가 일체화된 형태로 사업 ○ 식물공장 재배기술 이전 사업도 진행, 연매출 1,500만 엔
(유)도코 드림	1997년	리프양상추, 롤로로사, 샐러드 야채	499	28	10	○ 매출의 78%는 시식전문점, 도시락/샌드위치 체인점, 23%는 인터넷 판매로 구성 ○ 한데(노지)재배를 병행하여 식물공장의 손익을 맞추고 있음 ○ 연매출은 5,000만 엔 내외
(주)페어리 엔젤	2008년	양상추, 상추, 미즈나, 루꼴라 등	2,870	252	46	○ 일반 소매용으로 70%, 업무용으로 30% 판매 - 대량소비처는 출하 리스크를 고려해 판매하지 않음 ○ 생산 회전수를 올리기 위해 60g으로 크기를 줄여 판매 ○ 연매출 3억 엔 수준이었으나 2012년 5월부터 사업 중단
(주)라프란타	2004년	샐러드 야채, 허브	1,200	98	28	○ 올림푸스(Olympus) 사내식당 및 지역병원 1곳과 제휴판매 중 ○ 양상추 3종과 허브만 생산 판매(연매출 1.1억 엔) - 양상추는 40일, 허브는 20일 단위로 수확
스웨덴포닉 큐슈	1997년	파슬리, 바실	3,300	144	16	○ 총 5억 엔 투자/설치, 허브류 하루 6,000포트 생산 ○ 전국 백화점, 슈퍼마켓에 판매 중이나 최근 손익이 급격히 악화 - 전국판매로 운송비 비중이 높아 운송비 절감을 위해 거래처 조정을 시도 중
카메오카 플랜트	2007년	프릴 양상추, 모코 양상추, 로메인 등	2,868	350	30	○ 형광등 사용, 재배면적은 단수가 많아 25,200㎡ ○ 다이마루 코도점, 레스토랑, 오키나와 호텔, 브라이튼 호텔, 그란비아 호텔에 판매하며 연매출은 7억 엔
하이텍 하뉴	1996년	샐러드 야채, 리프양상추	499	24	9	○ 고압 나트륨램프 사용(설치비는 1.4억 엔) ○ 마르히토, 서미트, 스즈키아 등 소매점/식품 가공 메이커 스즈키아베이커리에 납품 중(상품화율 90%) ○ 연 10회 수확, 연매출 4,000만 엔으로 수치 균형
하이텍팜	1992년	리프 양상추, 프릴 양상추	400	21	4	○ 고압나트륨 램프 사용(설치비용은 1.2억 엔) ○ 소매점, 도매점, 식품업체 납품 ○ 상품화율 90%, 연매출 2,400만 엔으로 수치 균형

유럽

가. 벨기에 Hortiplan

- 광원 : 태양광 + 인공광(고압 나트륨등)
- 재배작물 : 상추류, 허브
- 재배방식 : 박막수경(NFT) + 순환식 수경재배시스템
- 특징
 - 재배 베드 자동 이송시스템(MGS : Mobile Gully System)을 중심으로 모종 자동 옮겨심기 로봇, 자동으로 심는 거리 조정방식 등 완전 자동화 생산 시스템 도입
 - 최소 인력으로 재배관리가 가능하며 생산성을 극대화한 모델 지속개발 보급
 - 모종 기르기(육묘) 전용 트레이를 사용하여 피트모스를 배지로 사용
 - 심음배기(재식 밀도)는 100포기/㎡
 - 피트모스에 재배한 모종은 재배한 후에도 배지와 함께 뿌리째로 수확·유통, 소비자까지 전달해 신선도 유지를 유지하고 부가가치를 높임.
 - 지열 히트펌프로 온도관리
 - 재배 베드 자동 이송시스템(MGS : Mobile Gully System)은 호주, 이탈리아, 네덜란드, 영국, 미국에서도 운영



유럽의 자연광 식물공장 전경(왼쪽 상추, 오른쪽 파프리카)

나. 네덜란드 KP-HOLAND(분화 식물공장)

- 규모 : 벤로형 유리온실 구조 - 3만 5,000㎡(3.5ha)
- 광원 : 태양광 + 인공광(자연광 병용형)
- 재배작물 : 칼랑코에 등 7개 품종
- 생산량 : 연간 450만본
- 재배기간
 - 12cm 포트에 재배, 간격 넓혀주기(스페이싱)는 한번하며 1배지에 재배 포트 수 648개 → 324개
 - 1주에 6~8만 포기 꺾꽂이(삽목), 칼랑코에의 경우 꺾꽂이(삽목) 후 4~5일이면 뿌리내림(활착), 총 재배기간은 14~18주
- 재배과정

모판흙(상토)·포트 공급 → 모판흙(상토) 채우기 → 물주기(관수) → 꺾꽂이(인력) → 자동 정렬 → 배지에 심기(648포기) → 활착실 이송 → 온실재배(저면관수 및 상부살수, 밑에서 물을 주고 위에서 물을 뿌림) → 중간 반출(운반대차) → 선별(영상 인식으로 불량 모종 검출 및 퇴출) → 자동정렬 → 배지에 심기(328포기) → 온실재배(저면관수 및 상부살수, 밑에서 물을 주고 위에서 물을 뿌림) → 반출(운반대차) → 선별(영상인식) → 포장(인력) → 출하용 캐리어 탑재(인력) → 포장 및 반출



분화 식물공장

♣ 네덜란드 식물공장 동향

- 딸기, 토마토, 파프리카 등의 열매채소류(과채류)를 공장형 생산시스템으로 생산하고 있으며, 잎숙기(적엽), 열매숙기(적과), 거두기(수확), 포장 등의 단계에서 많은 노동력이 들어가 수확 로봇, 유인 로봇 등을 개발하여 생산과정의 자동화를 최대한 실현해 가고 있다.
- 생산성 증대를 위해 고정식 재배시스템에서 이동식 재배시스템을 개발
- 인공광(LED, 고압 나트륨램프)과 자연광 혼합 방식 연구·개발
- 토마토 식물공장에서 이동식 홈통(거터, Gutter)시스템 이용
- 토마토 재배 시 막뿌리(부정근, 뿌리 이외의 기관에서 2차적으로 자란 뿌리)가 빈번히 발생하기 때문에 양·수분을 흡수할 수 있는 배지를 회전이 가능한 드럼에 부착하여 그 위에 줄기를 감고 양·수분을 공급하면 양·수분 이동거리가 짧아 수년 동안 재배가 가능하다.
- 파프리카 재배 시 열매를 숙아야 하는 특성(적립성)을 고려해 이동식 벤치 재배 시스템을 적용
- 정부와 유리온실 산업계는 환경에 미치는 영향을 최소화하는 동시에 유리온실의 에너지 비용을 줄이는 것을 목표로 에너지 절감, 작물 보호, 생산증대 등 다목적 프로그램들을 수립하여 운영(에너지 뉴트럴(Energy-neutral) 온실시스템, 자체발전 미래온실 프로젝트(Ekas Project : Electricity-producing Greenhouse) 등)



다. 스웨덴 Agritech Inovation A

- 규모 : 1ha 규모의 많은 수 농가(근래 점차적으로 규모 증대, 농산기업 참여)
- 재배작물 : 상추류, 허브
- 재배방식 : 박막수경(NFT) + 순환식 수경재배시스템
- 광원 : 고압 나트륨램프
- 생산량 : 잎상추 - 1일 5,000포기, 허브 - 1일 8,000개
- 특징
 - 스웨데포닉(Swedeponic) 시스템은 작물의 성장에 따라 빛을 잘 받도록 자동적으로 라인의 폭 간격(4단계)을 조절함
 - 피트모스를 이용한 피트 블록에 씨를 뿌려 모종을 기른 후 재배 생산라인에 아주심어 생육단계에 따라 거리 간격을 자동 조절
 - 재배베드 이송시스템, 거리 간격(스페이싱) 조절, 아주심기 로봇 등 자동화시스템 도입
 - 씨뿌리기, 아주심기, 거두기(수확), 포장 전 과정을 자동화시켜 노동력을 획기적으로 절감
 - 작물생산에는 8cm 사각 포트를 중심으로 표준화
 - 지열 히트펌프로 온도관리

♣ 스웨덴 식물공장 동향

- 플랜타곤(Plantagon)은 빌딩형 식물공장(Vertical Farm)건설 프로젝트를 추진

참고문헌

- Heo 등. 2012. 상이한 광조건 하에서 자란 적측면 상추의 초기생장, 색소형성, 단백질 및 PAL 효소 활성, Kor. J. Hort. Sci. Technol.
- Heo 등. 2009. 광질이 아게라툼, 아프리카매리골드 및 샬비아 실생묘의 생장, 순광합성속도 및 에틸렌 생산에 미치는 영향, J. Hort. Sci. Technol. 27(2)
- Takatsuji와 Mori. 2011. LED 식물공장, 월간공업신문사
- Takatsuji 등. 2009. 식물공장과 조명기술, 사이언스 & 테크놀로지
- Mizuno 등. 2009. 엽채류의 색소합성과 생장에 미치는 단색광 조사의 영향, 동경농업대학학위논문
- Takazuna 등. 2009. 고압나트륨 램프를 이용한 감자 수경재배, 일본생물환경공학회
- Shin 등. 2008. 기내 호접난 생장에 미치는 광질의 영향, Acta Physiol. Plant
- Heo 등. 2006. 초화식물의 생장에 미치는 혼합광질의 영향, J. Plant Biology
- Ida 등. 2006. 외부전극형광등(HEFL)을 이용한 엽채류 재배, 일본생물환경공학회
- Hukuda 등. 2006. 적색 및 청색광이 페튜니아 화성에 미치는 영향, 원예과학잡지
- Hirai 등. 2005. 서로 다른 단일광질 하에서 자란 토마토의 영양 및 생식생장, 일본생물환경공학회
- Heo 등. 2004. 절화 카네이션과 장미의 절화수명 및 품질에 미치는 적색광질의 영향, Plant Growth Regulation
- Heo 등. 2003. 시클라멘 개화에 미치는 광질과 명기시간의 영향, Plant Growth Regulation
- Heo 등. 2002. LED에 의한 단일 및 혼합광질 하에서 자란 아프리카 매리골드와 샬비아 실생묘의 생장 반응, Plant Growth Regulation
- Takatsuji 등. 1997. 식물공장 핸드북, 동해대학출판회
- 김재훈, 2010. 식물공장 시스템의 동향과 발전방향, J. Plant Biotechnol 37:442~455.
- 농촌진흥청, 1999. 식물공장생산시스템 연구동향
- 농촌진흥청, 2012. 식물공장 기술개발 로드맵
- 이용범, 최기영. 2010. 선진국의 식물공장 현황, Bioin 스페셜Zine 18호, 생명공학정책연구센터

- 강승원, 백준필, 서상규, 박권우, 이용범, 김선형. 2008. 식물공장. 월드 사이언스
- 남상용, 소창호, 조광현. 2011. 식물공장대전. RGB
- 이기명. 2007. 식물생산 시설환경제어 및 실습. 일일사
- 장동일. 2010. 농업기계설계Ⅱ. 씨아이알
- 농촌진흥청. 1996. 채소재배
- Kamp, P.G.H., Timmerman, G.J. 2003. 컴퓨터에 의한 온실환경제어. 한국침 단농업시설협의회
- 일본시설원예협회. 2003. 최신 시설원예 환경제어기술. 농촌진흥청 원예연구소 역
- 橋本 康. 1962. 植物工場入門. オーム社
- 福嶋邦彦. 2009. 植物工場とその照明技術. サイエンスとテクノロジー
- 高辻正基, 森 康裕. 2011. LED 植物工場. B&Tブックス
- (社)日本施設園芸協会. 1988. 施設園芸ハンドブック. 園芸情報センター
- 松崎昭二. 1992. 植物種苗工場. 化学工業日報社
- 高辻正基. 1996. 植物工場の基礎と実際. 裳華房



농어촌살리기 범국민운동본부

www.aidfarm.org

Blog.naver.com/farm-aid