

2.2 식물공장 환경설정

학습 목표: 식물공장 운영에 필요한 주요 환경 요소(빛·온도·습도·CO₂·양액)를 이해하고, 작물별 적정 설정값을 확인하며, 이상 발생 시 기본 대응 절차를 수행할 수 있다.

2.2-1 환경 설정의 개요 및 중요성

식물공장에서 '환경 설정(Environment Setting)'이란 재배 공간의 온도·습도·CO₂·광량·양액 농도를 작물의 생육 단계에 맞게 목표값으로 조정하는 작업입니다. 설정값들이 일정하게 유지되어야만 품질이 균일한 작물을 계획대로 생산할 수 있습니다.

환경 설정이 생산에 미치는 영향

- 온도가 1~2°C 만 벗어나도 생육 속도와 품질이 눈에 띄게 달라집니다.
- CO₂ 농도를 적절히 높이면 광합성 속도가 증가하여 수확량이 늘어납니다.
- 양액의 EC 나 pH 가 허용 범위를 벗어나면 뿌리 손상 및 영양 결핍이 발생합니다.
- 습도가 과도하게 높으면 병원균 번식이 촉진되어 작물이 병에 걸릴 위험이 높아집니다.

재배팀을 운영하는 식물공장의 경우, 초보직원은 설정값을 직접 변경하기보다 **현재 계기 수치를 정기적으로 확인하고, 설정 범위에서 벗어났을 때 신속하게 담당자에게 보고**하는 게 중요합니다. 이를 위해 각 항목의 의미와 확인 방법을 정확하게 알아야만 이상상황이 발생한 경우 빠르게 알아차릴 수 있습니다. 개인이 운영하는 식물공장의 경우에는 직접 설정을 조정해야 하기 때문에 더욱 정확하게 내용을 알고 있어야 신속한 대응이 가능합니다.

2.2-2 광(光) 환경 설정 - 조명 조건

광 환경은 식물 생육에서 가장 직접적인 에너지 공급원입니다. 광 설정은 크게 세 가지 요소로 구성됩니다.

광 설정 요소	설명 및 기준
PPFD (광합성 광자속 밀도)	빛의 세기 단위. 단위는 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. 상추 등 엽채류는 일반적으로 150~300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 범위에서 재배. 작물의 필요한 적정량보다 빛이 너무 강하면 틸번 발생, 너무 약하면 웃자람 발생.
광주기 (Photoperiod)	하루 중 조명이 켜져 있는 시간. 일반적으로 15 시간 조명 / 9 시간 소등이 기본 설정. 조명 시간 조절로 식물의 개화·성장 속도를 제어.
광질 (光質,	빛의 파장 구성. 적색광(600~700nm) + 청색광(400~500nm) 조합이

Spectrum)

기본. 적:청 비율은 작물 종류와 생육 단계에 따라 조정.

광 조건 관련 주의사항

- △ 전구(LED 모듈) 일부가 꺼진 경우 즉시 보고 및 조치 필요
 - 불균일한 광량이 생육 편차를 초래
- △ 타이머(광주기 컨트롤러) 설정 시간은 임의로 변경하지 말 것
 - 양액의 수준과 광량이 밸런스가 맞아야 작물의 품질을 유지할 수 있기 때문에 단순 조명시간이 늘릴 경우 웃자람이나 틱번이 과도해지기 쉽고 조명시간을 줄일 경우에는 중량저하 등 문제가 발생하기 쉬움

참고·첨부 자료

이 Lee S.W., 「Plant Factory and Plant Cultivation Using LED Light」, 2010 - DBpia (<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02477898>)

Yep & Guo, 「Plant Factories Are Heating Up: Hunting for the Best Combination of Light Intensity, Air Temperature and Root-Zone Temperature in Lettuce Production」, PMC (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7876451/>)

2.2-3 온도·습도 설정

온도와 습도는 식물의 광합성 속도, 증산 작용, 병원균 번식에 동시에 영향을 미칩니다. 두 요소는 독립적이지 않고 서로 밀접하게 연결되어 있어 함께 관리해야 합니다.

온도 설정

작물 종류	적정 주간 온도	적정 야간 온도	비고
상추류 (엽채류)	18~22°C	17~19°C	22°C 초과 시 웃자람 주의
시금치	15~20°C	12~15°C	고온에서 추대(꽃대) 발생
바질	22~28°C	18~22°C	저온에 민감, 10°C 이하 장애
딸기	18~22°C	8~12°C	야간 저온이 당도 향상에 기여

습도 설정

식물공장 내 적정 상대습도는 일반적으로 60~80% 범위입니다. 작물에 따라 적정습도는 달라질 수 있습니다. 기준치보다 습도가 높으면 잿빛곰팡이병·노균병 등 병원성 곰팡이가 번식하기 쉽고 너무 낮으면 증산이 과다하여 틱번이 발생하기 쉽습니다.

- 습도가 80% 초과: 순환 팬 가동 증가, 공조기 제습 모드 가동

- 습도가 60% 미만: 가습기 가동, 수분 보충 확인

온도 이상 발생 시 확인 사항

1. 공조기(냉난방기) 운전 상태 확인
 2. 외부 도어·환기구 개방 여부 확인
 3. 재배 베드 밀집으로 인한 열집적 여부 확인
- 이상 지속 시 즉시 담당 관리자에게 보고

온습도 환경유지를 위한 VPD(Vapor Pressure Deficit, 포차) 알아보기

VPD는 현재 식물공장 내에서 최대로 머무를 수 있는 수증기량과 현재 식물공장 내의 수증기량의 차이를 나타낸 수치입니다. 온도와 습도가 객관적인 측정치를 나타내는 값이라면 VPD는 온도와 습도의 관계에 따라 값이 바뀌게 됩니다.

식물은 잎을 통해 증산 작용을 합니다. 잎 뒷면의 기공을 열어 광합성을 위한 이산화탄소(CO₂)를 흡수하고, 내부의 수분을 뿜어내며 뿌리로는 양분액을 빨아들입니다. 이때 외부공기 중 수증기가 어느정도인지에 따라 증산 작용의 수준이 결정됩니다.

즉, 식물공장의 VPD의 수치가 어떠하냐에 따라 식물의 생육 정도가 크게 달라집니다. **VPD의 수치에 따른 작물의 상태를 미리 알아두면 식물공장의 환경을 유지하고 살피는 데에 큰 도움이 됩니다.**

VPD 수치에 따른 작물상태 변화

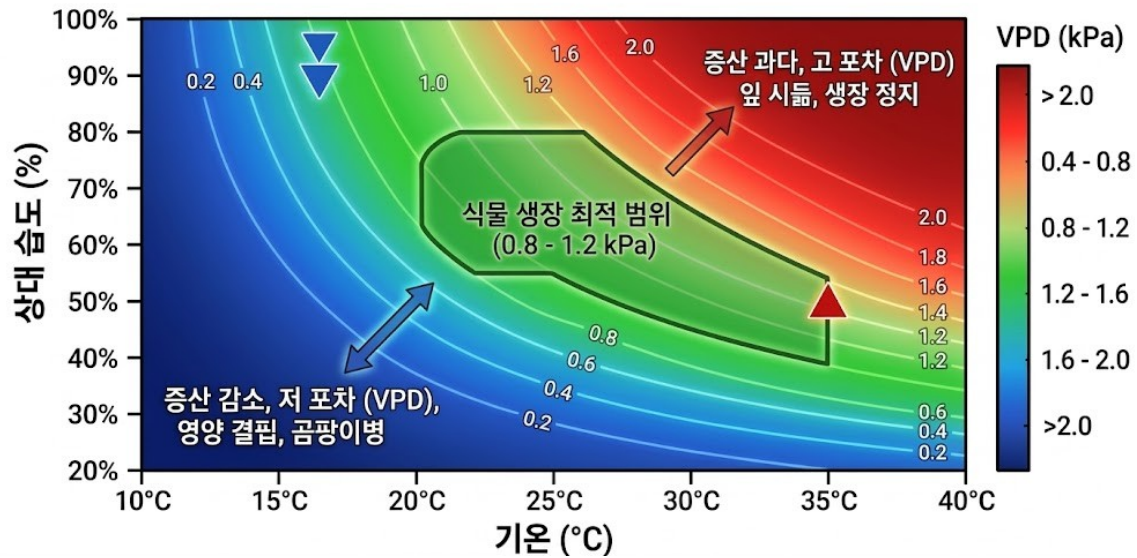
VPD 수치	공기상태	식물의 반응	결과
0.4 kPa 이하	너무 낮음 (다습)	증산작용 정지	칼슘 부족(팁번), 곰팡이병 발생
0.8 ~ 1.2 kPa	적정	적정한 교환	활발한 광합성 및 생장
1.5 kPa 이상	너무 높음 (건조)	기공폐쇄(수분보호)	광합성 중단, 시들 현상

식물은 증산 작용을 통해 물을 끌어올릴 때 비료 성분도 함께 흡수합니다. 이동성이 낮은 칼슘은 증산작용이 활발하지 못하면 식물의 잎 끝까지 성분이 도달하지 못합니다. 이로 인해 잎 끝이 타들어 가는 '팁번(Tip-burn)' 현상을 일어나고 작물품질에 큰 손실을 끼치게 됩니다. 또한 VPD가 너무 낮아 잎에 이슬이 맺히면 (결로), 곰팡이 균이 번식하기 딱 좋은 환경이 됩니다. 반대로 VPD 너무 높으면 건조한 공기로 인한 과도한 수분손실을 막기 위해 잎의 기공을 닫아버립니다. 이 경우 광합성을 위한 이산화탄소(CO₂) 흡수도 멈추기 때문에 작물의 성장저하가 오기 쉽습니다.

VPD가 적정할 때 식물은 기공을 활짝 열고 증산작용을 활발히 진행하며 양액의 양분과 공기 중 이산화탄소(CO₂)를 듬뿍 흡수합니다. 이것이 바로 작물 품질과 수확량 증대로 직결됩니다.

VPD 수치와 온습도 관계

기온, 상대 습도 (RH) 및 수증기압차 (VPD)의 관계



- 온도만 올라가고 습도 유지시: 같은 크기의 공간이라고 해도 공기가 담을 수 있는 수증기 그릇이 커집니다. 습도가 그대로라면 **VPD 는 높아집니다(더 건조해집니다)**
- 온도만 내려가고 습도 유지시 : 같은 크기의 공간이라고 해도 공기가 담을 수 있는 수증기 그릇이 작아집니다. 습도가 그대로라면 **VPD 는 낮아집니다(더 습해집니다)**
- 온도가 올라가고 습도도 오르면 : 수증기 그릇이 커지면서 그곳을 채우는 수분의 양도 같이 올라갑니다. 온도와 습도는 수치가 올라가도 **VPD 는 비슷하게 유지될** 수 있습니다.
- 온도가 내려가고 습도도 오르면 : 수증기 그릇이 작아지면서 그곳을 채우는 수분의 양이 늘어납니다. 습도가 조금 올랐다고 해도 **VPD 는 급격하게 낮아질 수 있습니다.**

식물공장의 경우 한정된 공간에서 다량의 식물을 재배하기 때문에 온도를 동일하게 유지하는 경우, 식물이 내뿜는 수증기로 인해 습도가 높아지며 VPD 가 낮아지기 쉽습니다. 특히 과습으로 인해 병해가 오는 경우 밀집된 작물로 인한 피해가 크기 때문에 주의가 필요합니다.

시설을 설치할 때 제습기를 용량을 충분히 확보하고 수시로 VPD 를 확인하여 식물공장 내부가 과습한 상태가 되지 않도록 조절하는 게 중요합니다.



사진 | 식물공장의 온습도 및 VPD 모니터링 화면

2.2-4 CO₂ 농도 설정

이산화탄소(CO₂)는 식물 광합성의 원료입니다. 대기 중 CO₂ 농도는 약 400ppm 이지만, 식물공장에서는 이를 인위적으로 높여 광합성 효율을 극대화합니다.

CO ₂ 농도 범위	생육 효과
400ppm (대기 농도)	기본 광합성 수준. 추가 효과 없음.
800~1,000ppm	광합성 촉진으로 생육 속도 증가. 대부분의 엽채류 재배 시 목표 범위.
1,000~1,500ppm	추가적인 생장 촉진. 단, 작물 종류에 따라 효과 차이 있음.
2,000ppm 초과	작물에 따라 오히려 생육 저해 가능. 환기 필요.

CO₂ 공급은 고압 봄베(가스통)에서 전자밸브를 통해 자동으로 조절됩니다. CO₂ 농도가 목표치 아래로 떨어지면 밸브가 열려 공급되고, 목표치에 도달하면 닫힙니다. 봄베 잔량이 줄어들면 미리 교체 예약을 해두어야 운영 공백이 생기지 않습니다.

CO₂ 취급 안전 주의사항

- △ CO₂ 는 고압 가스이므로 봄베 보관 및 연결 작업은 교육받은 담당자가 수행합니다.
- △ CO₂ 농도가 비정상적으로 높아지면(3,000ppm 이상) 두통·어지럼증을 유발할 수 있으므로,

작업 전 환기를 실시하십시오.

△ CO₂ 봄베는 직사광선·고온 장소 보관 금지. 전도 방지 체인 고정 필수.

2.2-5 양액(EC·pH) 설정

양액 관리는 식물공장 운영에서 가장 일상적으로 확인해야 하는 항목입니다. EC와 pH 두 수치가 작물의 양분 흡수와 건강 상태를 좌우합니다.

EC (전기전도도) 관리

작물	적정 EC 범위 (mS/cm)
상추류	1.4~2.0
시금치	1.5~2.5
바질 등 허브류	1.0~2.0
딸기 (정식기)	0.6~0.8 → 수확기 1.0~1.2
일반 과채류(토마토·파프리카)	2.5~4.0

pH 관리

양액의 pH는 5.5~6.5 범위를 유지하는 것이 일반적입니다. pH가 범위를 벗어나면 특정 무기 이온이 침전되거나 작물이 흡수하지 못하는 형태로 변하여 영양 결핍 증상이 나타납니다.

- pH가 낮을 때(산성): 수산화칼륨(KOH) 희석액으로 올림
- pH가 높을 때(알칼리성): 질산(HNO₃) 또는 인산(H₃PO₄) 희석액으로 내림
- pH 조정액 취급 시 장갑·보안경 착용 필수 (강산·강알칼리)

순환식 양액 관리 원칙

농촌진흥청이 개발한 한국형 순환식 수경재배 기술에 따르면, 순환식 시스템 적용 시 비순환식 대비 비료 사용량을 30% 이상 절감할 수 있으며, 상품 수량과 품질도 동등한 수준을 유지합니다. 사용한 배액을 살균·여과 후 재사용하는 방식이 환경적으로도 유리합니다.

참고·첨부 자료

농촌진흥청, 「환경 살리는 한국형 순환식 수경재배 시스템 개발」, 정책브리핑
(<https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156215194>)

농사로(농촌진흥청), 「양액재배 및 배양액 관리」
(<http://www.nongsaro.go.kr/portal/ps/psb/psbk/kidofcomdtyDtl.ps?>)

menuId=PS00067&kidofcomdtyNo=21969)

충청남도농업기술원, 「양액(수경)재배」 기술자료
(<https://cnongup.chungnam.go.kr/home/sub.cs?m=132>)

2.2-6 환경 기록과 이상 대응

환경 수치는 자동으로 기록되는 경우도 있지만, 직원이 정기적으로 육안 확인·수기 기록을 병행하는 것이 중요합니다. 이상이 빠르게 발견될수록 피해를 줄일 수 있습니다.

점검 주기	확인 항목
매일 1 회 이상 (오전 작업 시작 시)	온도·습도 수치 확인, CO ₂ 농도 확인, LED 조명 정상 작동 여부, 양액 탱크 수위
격일 또는 주 3 회	EC·pH 수치 측정 및 기록, 배관·호스 누수 여부, 재배 베드 양액 흐름 상태
주 1 회	필터 막힘 여부 점검, 탱크 내 이끼·침전물 확인, 공조기 필터 상태
월 1~2 회	전체 배관 소독·세척 여부 확인, 센서 캘리브레이션(재보정)

△ 이상 발생 시 대응 원칙 (초보 직원용)

- Step 1. 이상 수치·현상을 정확히 관찰하고 기록합니다.
- Step 2. 임의로 설정을 변경하지 않습니다. (추가 피해 위험)
- Step 3. 담당 관리자 또는 선임에게 즉시 보고합니다.
- Step 4. 지시에 따라 조치를 지원합니다.
- Step 5. 조치 후 결과를 재배 일지에 기록합니다.