토마토 잎의 비파괴 계측에 의한 저광, 저온, 과염 장해 진단법 비교

Comparison of Non-destructive Measuring Methods to Detect Low Light, Low Temperature and High Salinity Stresses of Tomato

류육성* 서상룡* 정갑채** 고병진* 성제훈***

정회원 정회원 정회원 정회원

Y.S. Ryu S.R. Suh G.C. Chung B.J. Koh J.H. Sung

1. 서론

재배 중인 작물의 생육상태를 파악하는 수단으로서 농업 종사자들은 인간의 육안에 의해 관찰한 결과를 그 동안 축적한 경험과 대조하여 그 장해상태 정도를 판단하여 왔다. 그러나 이와 같은 방법은 관찰자의 주관에 좌우되는 문제가 있다. 최근 과학기술의 발달에 따라 특정 계측기를 사용하여 관찰 대상 작물의 특성을 관찰하고 그 결과로부터 작물의 생육상태를 객관적으로 파악하려는 기술이 개발되고 있다.

생육중인 작물을 대상으로 할 경우 작물의 계측은 작물의 잎이나 줄기의 비파괴적인 생체 (in-vivo) 계측을 필요로 하며 비접촉으로서 원격측정이면 더욱 바람직하다. 이러한 특성을 갖춘 계측기로서 그 이용의 가능성이 높은 측정기의 종류와 특성은 성 등(1998, 1999)이 논의한 바와 같다. 이러한 측정기를 사용한 작물의 생육장해의 진단은 가능한 조기에 진단할 수 있어야 한다. 따라서 작물재배 현장에서 이러한 계측기의 유용성은 생체정보 수집의 가능성 여부 및 측정의 신속성 등과 조기진단(early detection)의 수준에 의해 결정된다.

본 연구는 오이와 토마토의 생육장해 진단법을 찾는 성과 서 등(1999)이 수행한 연구의 일환으로서 저광, 저온, 염류과다 장해가 있는 토마토를 공시재료로 하여 식물의 단엽 또는 군락으로부터 비교적 신속하게 생체정보 수집이 가능한 주요 비파괴 계측기를 대상으로 각 측정기별 작물 생육장해 조기진단 가능성의 여부와 그 진단의 유용한 정도를 파악하기 위한 목적을 갖고 수행하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료와 사용기기

1) 실험재료

본 연구에서 사용한 토마토(Lycopersicon escul entum Mill.)는 인큐베이터 내에서 암발아시킨 후, 훈탄으로 이식한 다음, 본엽이 4 ~ 5 매 전개될 때까지 재배 후 4 ℓ 양액통과 양액 박막 시스템에 정식하여 양액 재배 방식으로 생육하였다.

양액 재배에서는 양액의 영양분을 식물체의 생육상태에 따라 조절이 가능하므로 영양분의 생육 제한 요인을 용이하게 부가할 수 있어, 특정 원소 결핍 등을 유발하기에 적당하다.

실험은 저광, 저온, 염류과다 장해를 준 토마토(처리구)와 정상생육 토마토(대조구)를 비교하는 방법으로 수행하였다.

* 전남대학교 농과대학 농공학과

** 전남대학교 농과대학 응용식물학부

*** 농촌진흥청 농업기계화연구소

양액재배시 사용한 양액은 3 차 증류수에 기본적으로 Cooper 양액 조성법을 적용하되 염류과다 토마토의 양액은 Cooper 양액의 4 배을 첨가하는 방법으로 처리하였다.

저광 장해는 차광막을 이용하여 토마토에 조사되는 태양광의 일부를 차단하는 방법으로 수행하였으며, 저온 장해는 양액의 온도를 낮추어 토마토의 근권온도를 8 ~ 13 ℃로 낮추는 방법으로 수행하였다.

양액재배시 지하부의 환경을 균일하게 하기 위해 양액 통에는 공기펌프를 설치하여 공기를 공급하였다. 배양액은 토마토의 양분흡수가 배양액 영양분의 종류별로 달라서 시간 경과에 따라 배양액의 조성이 변하기 때문에 2 ~ 3 일 간격으로 전량을 새로운 배양액으로 교환하였다.

2) 실험기기

본 연구에서 사용한 실험기기는 모두 7 종으로서 이들은 작물 생체정보를 수집하는 방법에 따라 식물체 단엽용과 군락(canopy)용으로 구분할 수 있다. 단엽을 대상으로 측정하는 계측기는 엽록소 함량을 측정하는 엽록소함량측정기(chlorophyll meter, Minolta Co. Ltd., Japan, model SPAD-502), 광합성 효율을 나타내는 Fv/Fm과 Fm/2 상승시간($t_{1/2}$)을 측정하는 엽록소 형광측정기(chlorophyll fluorescence measurement system, Morgan Scientific Inc. USA, model CF-1000), 대기온과 엽온의 차(DT)를 측정하는 적외선 엽온측정기 (infrared AG multimeter, Everest Interscience, Inc. USA, model 510B), 증산과 기공저항을 측정하는 기공 저항측정기 (LI-COR, Inc., LI1600), 측정 범위가 400 ~ 2500 nm에서 2 nm 간격으로 식물 잎의 흡광도 스펙트럼 자료를 수집하는 근적외선 분광분석기(NIRSystem, Perstorp Analytical, Inc., 6500)이다. 군락을 대상으로 측정하는 계측기는 군락의 반사도를 측정하는 다파장 복사계(multi spectral radiometer, CROPSCAN, Inc., model MSR16)와 엽면적 지수를 측정하는 canopy analyzer(LI-COR, model LAI-2000)이다. 본 연구에서 사용한 다파장 복사계는 중심파장 485, 560, 660, 830 nm에서 작물 군락의 복사량을 입사량에 대한 비율로서 측정하는 기기이고, canopy analyzer는 작물 군락 무성도의 상대적 크기인 엽면적 지수(leaf area index)를 광학적인 방법으로 측정하는 기기이다.

나. 실험방법

단엽용 계측기는 소형의 4 ℓ 양액통이나 양액 박막 시스템으로 재배한 토마토에서 3 ~ 4 주를 선택하고 이들의 여러 잎 중 엽령이 3 ~ 4 주 정도 된 2 개 잎을 각각 측정대상으로 선정하여 그 특성을 측정하였다. 군락용 계측기는 양액 박막 시스템에 정식한 토마토만을 대상으로 하여 군락의 특성을 측정하였다. 전술한 7 종 계측기의 각 측정항목은 12 ~ 20 일간의 토마토 재배 실험 기간 동안 매일 오전 10:00 ~ 12:00 사이에 측정하였다.

이러한 토마토의 생육장해에 대한 실험은 그 결과의 재현성 정도를 확인하기 위하여 각 장해별로 수회 반복하였는데, 단엽용 계측기의 경우 저광 장해 실험은 4 ~ 6 회, 저온 장해 실험은 2 ~ 4 회(기공저항측정기는 1회), 과다염류 장해 실험은 4 ~ 5 회(기공저항측정기는 1회) 반복 실험하였고, 군락용 계측기에 의한 실험은 실험한 3 가지 환경 장해에 대하여 각 2 회(저온장해에 대한 다파장 복사계는 1 회)반복 실험하였다. 이상의 모든 실험은 광주시 소재 전남대학교 실험포장내 플라스틱 온실과 인공생육실(growth chamber)에서 98년 1월부터 99년 10월까지 약 2 년간에 걸쳐 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 고려한 토마토 생육장해 진

단방법은, 먼저 생육장해를 받은 토마토(처리구)와 정상적으로 재배한 토마토(대조구)의 특성을 비교하여 양자를 구분하는 방법(대조구 비교법)의 가능성을 검토하였고, 만일 이 대조구 비교법에 의해 장해진단이 가능한 경우는 다음 단계로서 단순히 관측값(임계값)에 의한 장해 진단(임계값 비교법)의 가능성을 검토하고 가능한 경우는 그 임계값을 구하고자 하였다.

대조구 비교법에 의한 장해 진단을 위하여 본 연구에서는 각 실험기기별 측정결과를 이용하여 각 측정일별로 처리구와 대조구간의 유의수준(α)을 t-검정(MS-Excel 사용)에 의해 분석한 후 처리 12 일 이내에 유의수준 5 % 이하를 연속해서 3일 이상 유지한 경우 이를 장해 진단이 가능한 것으로 규정하고 이를 구하였다.

임의 측정항목의 대조구 비교법에 의한 진단이 가능한 경우 본 연구에서는 그 측정항목에 의한 진단의 유용성을 다른 측정항목과 비교하기 위하여, 첫째 장해발생 후 최초 진단가능일(처리구와 대조구간 유의수준 5 % 이하를 연속해서 적어도 3 일 이상 유지한 기간의 첫째 날)을 구하였고, 둘째 그 측정항목에 의한 진단의 정확도(수회의 반복실험 중 진단이 가능했던 실험 횟수의 비율로서 이에 각 반복실험의 처리구와 대조구간 유의수준이나 진단가능 연속일수 등을 고려하여 ±7 % 범위에서 그 값을 보정하여 결정)을 구하였다.

이상의 대조구 비교법에 의한 각 측정기별 저광, 저온, 과염 생육장해에 대한 실험자료의 분석 결과는 다음과 같다.

가. 엽록소측정기

저광 장해 처리구와 대조구를 대상으로 토마토 잎의 엽록소 함량 측정결과를 예시한 것은 그림 1과 같다. 그림과 같이 처리 경과일수에 따라 대조구가 처리구보다 높아지는 경향이 명백하였다.

엽록소 측정기를 이용한 저광 장해 진단은 장해 발생 후 빠르면 3 일, 늦어도 11 일 정도면 가능하였으며, 진단가능성은 50 % 정도로 판단되었다.

저온과 염류과다 장해는 장해 부과 후 일자 경과에 불구하고 엽록소 측정기의 측정값에 있어 대조구와 처리구간 차이가 나지 않았다. 따라서 엽록소 측정기를 이용한 저온과 염류과다 장해의 진단은 불가능한 것으로 판단되었다.

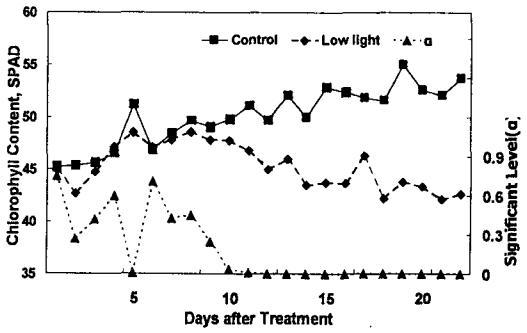

Fig.1 Comparison of chlorophyll content in low light and controlled tomato.

나. 엽록소 형광측정기

엽록소 형광측정기를 이용하여 저광 장해 처리구와 대조구의 Fv/Fm과 $t_{1/2}$ 측정결과를 예시한 것은 그림 2와 같다.

저광 장해 토마토의 경우 광합성 효율(Fv/Fm)과 $t_{1/2}$에 의한 진단은 장해부과 후 늦어도 11 일 정도면 가능하였으며 진단의 적중률은 75 % 수준으로 판단되었다.

저온 장해의 Fv/Fm과 $t_{1/2}$의 측정에 의한 진단은 장해 발생 후 7 ~ 11 일 정도면 그 진단이 가능한 경우가 있었으며 진단의 적중률은 25 %의 낮은 수준이었다.

염류 과다 장해의 경우 엽록소 형광측정기에 의한 진단은 불가능한 것으로 나타났다.

다. 적외선 엽온측정기

저광 장해와 저온장해의 엽온측정에 의한 진단은 불가능한 것으로 판단되었다.

염류 과다 장해 토마토의 엽온에 의한 진

단 가능성을 확인하고자 대기온과 엽온 차(DT)의 측정결과 중 그 차가 명백한 것을 예시한 것은 그림 3과 같다. 그림과 같이 염류과다 장해는 대조구와 처리구의 DT가 장해 발생 후 1 ~ 2 일부터 진단이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 수차의 반복실험에 의해 판단한 진단의 적중률은 50 % 정도였다.

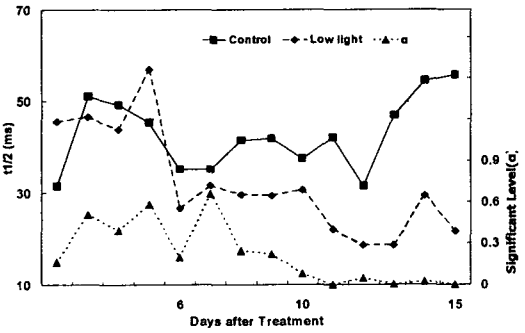

Fig. 2 Comparison of half rise time($t_{1/2}$) in low light and controlled tomato.

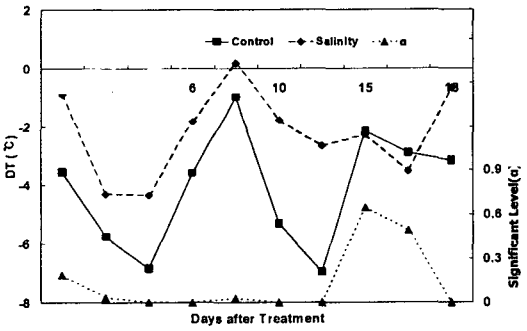

Fig. 3 Comparison of DT in salinity and controlled tomato.

라. 기공 저항측정기

저광 장해 처리구와 대조구 토마토 잎의 증산과 기공 저항 측정결과를 예시한 것은 그림 4, 5와 같다. 저광 장해의 최초진단가능일이 2 ~ 7 일의 범위였고 진단의 적중률 80 % 수준으로 판단되었다.

저온 장해의 최초진단가능일은 4 일 이내이고 진단의 적중률은 60 % 수준으로 판단되었다. 염류 과다 장해의 최초진단가능일은 5 일 이내이고 진단의 적중률은 60 % 수준으로 판단되었다.

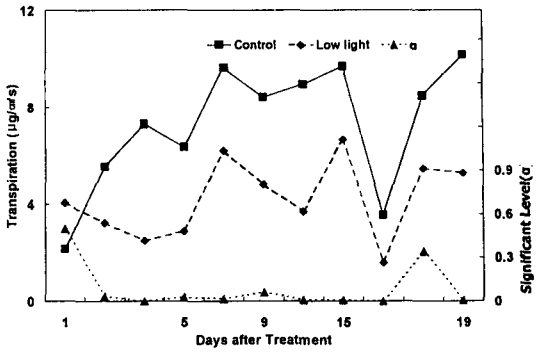

Fig. 4 Comparison of transpiration in low light and controlled tomato.

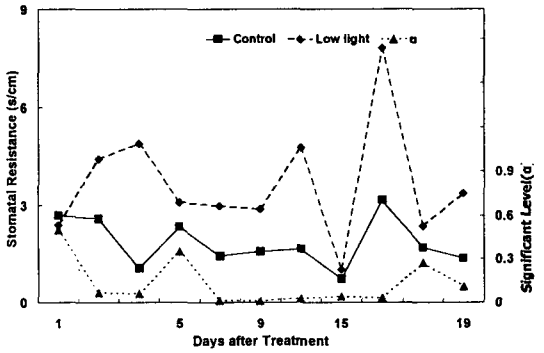

Fig. 5 Comparison of stomatal resistance in low light and controlled tomato.

마. 근적외선 분광분석기

근적외선 분광분석기로 측정한 토마토 잎의 분광 스펙트럼 자료는 각 처리 토마토 잎의 분광 특성을 찾기 위하여 성(1998)과 류(2000)에서 설명한 바와 같이 먼저 각 처리에 민감한 광 파장대(민감 파장대)를 찾은 다음 그 파장대의 중심파장을 구하였다. 그리고 그 중심파장의 흡광도 변화를 대조구와 처리구간 비교하여 근적외선 분광분석에 의한 해당 장해 진단의 유용성을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

저광 장해 진단에 민감한 파장대는 596 ~ 612 nm, 692 ~ 714 nm의 2 개 대역(중심파장은 각각 604, 702 nm)으로 선정되었다. 저온 장해 진단에 민감한 파장대는 모두 적외선 영역으로서 1408 ~ 1422 nm, 1876 ~ 1932 nm의 2 개 대역(중심파장은 각각 1414, 1904 nm)으로 선정되었다. 염류 과다

장해 진단에 민감한 파장대는 514 ~ 618 nm, 620 ~ 690 nm, 692 ~ 720 nm의 3 개 대역(중심파장은 각각 562, 652, 708 nm)으로 선정되었다.

저광 장해 진단에 민감한 중심파장 600, 702 nm에서 저광 장해의 진단은 최초진단가능일이 3 일 정도이고 진단의 적중률은 70 % 수준으로 나타났다. 저온 장해 진단에 민감한 중심파장 1414, 1904 nm는 최초진단가능일이 7 일 정도였고 진단의 적중률은 50 % 수준이었다. 저온 장해 실험 결과 중 1414, 1904 nm에서 처리구와 대조구의 흡광도 변화와 유의수준을 예시한 것은 각각 그림 6과 7과 같다. 염류장해 진단이 적합한 중심파장 562, 652, 708 nm에서 염류장해의 최초진단가능일이 2 일 정도였으나 진단의 적중률은 25 % 정도 낮은 수준이었다.

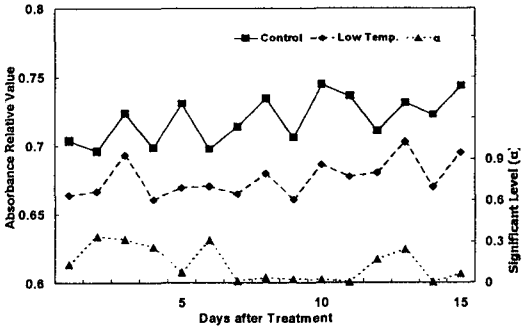

Fig. 6 Comparison of light absorbance in low light and controlled tomato at a wavelength of 1414 nm.

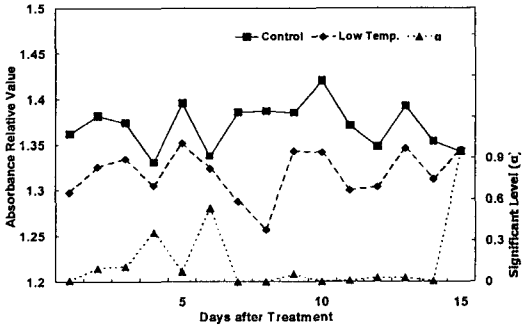

Fig. 7 Comparison of light absorbance in low light and controlled tomato at a wavelength of 1904 nm.

바. 다파장 복사계

저광 장해 진단을 위해 다파장 복사계를 이용하여 전술한 4 종의 파장대에서 관찰한 결과 중심파장 485, 560 nm에서 장해 발생 후 6 ~ 8 일 정도면 진단이 가능하였고 진단의 적중률 60 % 수준으로 판단되었다.

저온 장해 진단은 전술한 4 개의 파장 모두에서 진단이 가능하였으며, 최초진단가능일은 2 ~ 4 일 정도이고 진단의 적중률은 저광 장해 진단과 마찬가지로 60 % 수준으로 나타났다. 염류과다 장해 토마토는 중심파장 830 nm를 제외한 나머지 3 종 파장대에서 장해 발생 후 4 ~ 7 일 째부터 그 진단이 가능하였으며, 실험결과 적중률은 60 % 정도로 판단되었다. 그림 8은 염류 장해 처리구와 대조구의 복사도 변화를 다파장 복사계의 660 nm에서 관찰하고 그들의 유의성 수준을 보인 것이다.

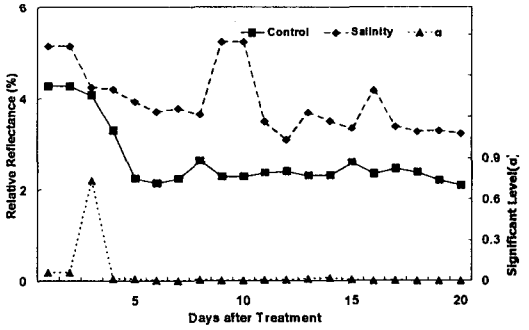

Fig. 8 Comparison of relative reflectance in salinity and controlled tomato at a wavelength 660 nm by MSR.

마. canopy analyzer

저광 장해와 저온 장해의 canopy analyzer에 의한 진단은 장해 발생 후 4 ~ 8 일 정도면 가능하였다. 염류 과다 장해의 진단은 장해 발생 후 5 일 째부터 처리구와 대조구간에 명백한 차이를 보여 그 진단이 가능하였다.

canopy analyzer의 진단 능력을 전술한 다파장 복사계의 것과 비교하면 다파장 복사계의 진단능력이 조기진단의 관점에서 더 우

수함을 알 수 있었다.

바. 임계값 비교법에 의한 진단 가능성 검토

본 연구에서 생육장해 진단법으로 대조구 비교법과 임계값 비교법에 의거하여 진단을 하고자 하였으나, 대조구 비교법에 의하여 장해 진단이 가능한 계측기기별 조사항목을 대상으로 임계값을 결정하여 비교하여 보면, 일정한 수준으로 나타나지 않아 임계값 결정을 할 수가 없었다. 따라서 임계값 비교법에 의한 진단을 할 수 없었다.

4. 요약 및 결론

토마토를 공시재료로 하여, 생육 중인 토마토 잎으로부터 비교적 신속하게 생체정보 수집이 가능한 비파괴 계측기인 엽록소 측정기, 엽록소 형광측정기, 적외선 엽온측정기, 기공 저항측정기, 근적외선 분광분석기, 다파장 복사계, canopy analyzer를 이용하여 저광, 저온, 과다 염류 장해 토마토의 조기 진단 가능성 여부와 그 유용한 정도를 파악하기 위하여 수행한 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

가. 저광 장해 진단이 가능한 계측기는 엽록소 측정기, 엽록소 형광측정기, 기공 저항측정기, 근적외선 분광분석기로 나타났다. 이 중 근적외선 분광분석기에 의한 진단은 최초진단가능일이 3 일 정도의 비교적 조기에 정확도 70 % 수준의 진단이 가능한 것으로 나타났다.

나. 저온 장해진단이 가능한 계측기는 엽록소 형광측정기, 기공 저항측정기, 근적외선 분광분석기이다. 이 중 근적외선 분광분석기는 다른 장해의 민감파장대와 다르게 근적외선 영역에서만 그 진단이 가능하였다.

다. 염류 과다 장해 진단이 가능한 계측기는 적외선 엽온 측정기, 기공 저항측정기, 근적외선 분광분석기이다. 이 중 기공 저항측정기에 의한 진단은 최초진단가능일이 5 일 정도이고 진단의 정확도는 60 % 수준으로서 다른 측정기보다 그 진단의 가능성이 가장 높게 나타났다.

라. 다파장 복사계와 canopy analyzer에 의한 장해 진단은 실험한 3 가지 환경 장해 모두 가능하였으며, 진단수준으로 비교하면 다파장 복사계가 canopy analyzer보다 우수한 것으로 판단되었다.

5. 참고문헌

1. 성제훈. 1998. 오이 생육장해의 비파괴 진단법 개발. 박사학위논문. 전남대학교.
2. 류육성. 2000. 토마토의 생체계측과 생육장해 진단. 석사학위논문. 전남대학교.
3. Blazquez-CH, Nigg-HN, Hedley-LE, Ramos-LE, Smpson-SE. 1996. Field assessment of a fiber optic spectral reflectance system. HortTechnology. 6(1):73-76.
4. Carter, G. A. 1994. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. Int. J. Remote Sensing. 15(3):697-703.
5. Carter, G. A. 1994. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. Int. J. Remote Sensing. 15(3):697-703.
6. Jackson, Ray D., et al. 1986. Detection and evaluation of plant stresses for crop management decisions. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 24(1):99-106.
7. Lichtenthaler, H. K., et al. 1998. Plant stress detection by reflectance and fluorescence. Annals of New York Academy of Sciences. 455-469.