

토마토의 비파괴 생체계측과 생육장애 진단

In-vivo nondestructive measurement and diagnosis of stresses of tomato

류육성* 서상룡* 정갑채** 성제훈***
정희원 정희원 정희원
Y.S. Ryu S.R. Suh G.C. Chung J.H. Sung

1. 서론

첨단 산업에 있어서 기초 기반 기술은 계측, 제어 및 정보와 관련된 각종 정보처리 기술의 응용이며, 미래형 농업기계기술 개발에 있어서 중요한 한 가지는 생물의 비파괴적인 정보 수집과 그 처리 기술로 예상된다.

작물의 생육상태를 파악하는 것은 농업인의 염원인데, 그 동안 농업인은 이를 위하여 인간의 오관에 의해 관찰한 결과를 경험과 대조하여 판단하여 왔다. 그러나 최근 과학기술의 발달에 따라 이와 같은 절차를 기로 함으로서 객관적인 판단을 하고자 하는데 이를 위해서는 계측기술의 개발이 우선하는 당면 과제이다. 특히 재배중인 작물을 대상으로 할 경우 이를 위한 주요 관심 기술이 비파괴 계측 기술이다.

작물의 생육장애 진단은 식물체의 계측에 의해 수행된다. 식물체 계측은 생육중인 작물을 대상으로 할 경우, 작물의 잎이나 줄기의 비파괴적인 생체 계측을 필요로 하며 비접촉이면 더욱 바람직하고, 그 측정결과는 생육장애를 가능한 조기에 진단할 수 있어야 한다. 따라서 작물재배 현장에서 이러한 관측 항목의 유용성은 조기진단(early detection)의 수준과 생체정보 수집의 가능성 여부 및 측정의 신속성 등에 의해 결정된다.

본 연구의 주요 목적은 영양결핍 장애(N, P, Ca 결핍)가 있는 토마토를 공시재료로 하여, 식물 단엽과 균락으로부터 비교적 짧은 시간에 생체정보 수집이 가능한 주요 비파괴 계측기를 대상으로 각 측정별 장애의 조기 진단 가능성 여부와 그 유용한 정도를 파악하기 위한 목적을 갖고 수행하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료와 사용기기

1) 실험재료

본 연구에서 사용한 토마토(*Lycopersicon esculentum* Mill.)는 인큐베이터 내에서 암발아시킨 후, 훈탄(caboronized chaff)으로 이식한 다음, 본엽이 4 ~ 5 매 전개될 때까지 재배 후 4 ℓ 양액 통과 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 N, P, Ca 결핍 장애를 준 토마토(처리구)와 정상생육 토마토(대조구)를 동시에 비교 관찰하는 방법으로 수행하였다. 양액재배시 사용한 양액은 3 차 증류수에 기본

* 전남대학교 농과대학 농공학과
** 전남대학교 농과대학 응용식물학부
*** 농촌진흥청 농업기계화연구소

적으로 Cooper 양액 조성법을 적용하되 처리구 토마토의 양액은 각각 N, P, Ca 성분을 배제하여 조성하였다.

양액재배시 지하부의 환경을 균일하게 하기 위해 양액 통에는 공기펌프를 설치하여 공기를 공급하였다. 배양액은 토마토의 양분 흡수가 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 단엽과 군락을 대상으로 생체정보를 수집할 수 있는 실험기기로 구분할 수 있다. 엽록소 함량을 측정하는 엽록소 측정기(chlorophyll meter, Minolta Co. Ltd., Japan, model SPAD-502), 광합성 효율을 나타내는 Fv/Fm과 $t_{1/2}$ 상승 시간을 측정하는 엽록소 형광측정기(chlorophyll fluorescence measurement system, Morgan Scientific Inc. USA, model CF-1000), 엽온과 대기온의 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 고체와 액체의 흡광도 스펙트럼 자료를 수집하는 근적외선 분광분석기(NIRSystem, Perstorp Analytical, Inc., 6500)등은 단엽을 대상으로 측정하는 실험기기이다. 군락의 반사도를 측정하는 다파장 복사계(multi spectral radiometer, CROPSCAN, Inc., MSR16)와 엽면적 지수를 측정하는 canopy analyzer(LAI-2000, LI-COR, USA) 등은 군락을 대상으로 측정하는 실험기기이다. 이와 같이 본 연구에서는 7 종의 실험기기를 사용하였다.

나. 실험방법

실험은 광주시 소재 전남대학교 실험포장과 인공생육실에서 98년 1월 ~ 99년 10월까지 각 장해별로 12 ~ 20 일간 3 ~ 5 회 반복하였다.

단엽을 대상으로 측정할 수 있는 계측기는 개체(individual, 4 l 양액통에 정식한 토마토)와 군락(canopy, 양액 박막 시스템에 정식한 토마토)상태에 있는 토마토에서 여러 잎 중 엽령이 3 ~ 4 주 정도 된 한 주에서 2 개 잎을 선정하여 측정하였다.

군락을 대상으로 측정할 수 있는 계측기는 양액 박막 시스템에 정식한 토마토를 대상으로 측정하였다.

이와 같이 전술한 7 종 계측기를 사용하여 각 조사항목을 1 ~ 2 일 간격으로 10:00 ~ 12:00 시 사이에 실험 기간동안 측정하였다.

다. 생육장해 진단법

본 연구에서 사용한 실험기기로부터 얻은 생체정보를 이용하여 생육장해를 진단할 수 있는 방법은 대조구 비교법과 임계값 비교법이 있다.

대조구 비교법은 생육장해를 준 토마토(처리구)와 정상적인 방법으로 재배한 토마토(대조구)를 비교하는 방법이고, 임계값 비교법은 임계값 이상, 이하, 범위 내외로 판정하는 방법이다. 여기서 임계값은 표준화되고, 정량화된 임계값이 아니고, 본 연구에서 실험결과를 이용하여 선정한 임계값을 의미한다.

1) 생육장해 진단 절차

7종 실험기기를 사용하여 얻은 생체정보를 이용한 생육장해 진단은 먼저 대조구 비교법에 의해 진단을 하는데, 분석은 전 실험 기간 동안 수집한 모든 자료에 대하여 수행하고 그 결과는 실험일자과 조사 항목별의 2 차원 배열로 정리하였다.

본 연구에서는 실험기기별 조사항목을 대상으로 측정일 경과에 따른 처리구와 대조구

간의 평균값과 t-검정의 유의수준(α) 변화를 조사하여(MS-Excel 사용) 처리 12 일 이내에 유의수준 5 % 이하를 연속해서 3일 이상 유지한 것을 장애 진단이 가능한 조사 항목으로 규정하고 이를 구하였다.

진단이 가능한 경우 그 과정에서 최초진단가능일(처리구와 대조구간 유의수준 5 % 이하를 연속해서 적어도 3 일 이상 유지한 기간의 첫째 날)을 구하였으며, 이를 비교하여 실험한 각 생육 장애별로 각 측정기의 적중률(수차의 반복 실험 중 유의하게 나타난 실험 횟수로부터 기본 적중률을 구하고, 이에 최초진단가능일을 고려하여 ± 5 % 범위에서 그 값을 보정하여 결정)을 구하였다.

대조구 비교법에 의해 진단이 가능한 장애별 조사 항목을 대상으로 임계값을 결정하여 임계값 비교법으로 진단하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 엽록소 측정기

N 결핍 처리구와 대조구를 대상으로 토마토 잎의 엽록소 함량 측정결과를 예시한 것을 그림 1과 같다. 그림과 같이 처리 경과 일수에 따라 대조구가 처리구보다 높아지는 경향이 명백하였으며, 대조구 비교법에 의한 진단은 적중률 70 % 수준에서 최초진단가능일이 6 ~ 10 일 정도면 가능하였다.

Ca 결핍 장애 진단은 적중률 45 % 수준에서 최초진단가능일이 5 ~ 12 일 정도면 가능하였다. 그러나 P 결핍 장애 토마토는 처리 경과 일수에 따라 처리구와 대조구의 차이가 불분명하여 진단이 불가능하였다.

나. 엽록소 형광 측정기

엽록소 형광 측정기를 이용하여 N 결핍 처리구와 대조구의 Fv/Fm과 $t_{1/2}$ 측정결과를 예시한 것은 각각 그림 2, 3과 같다. N 결핍 장애의 대조구 비교법에 의한 진단은 적중률 40 % 수준에서 최초진단가능일이 6 ~ 9 일 정도면 가능하였으며, P 결핍과 Ca 결핍 장애 진단은 불가능하였다.

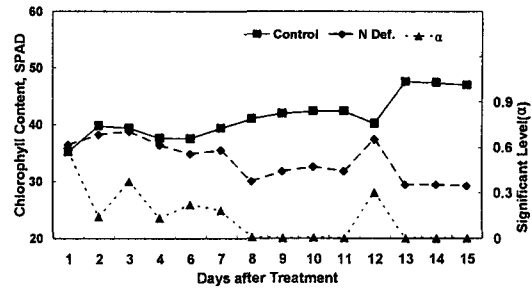


Fig. 1 Comparison of chlorophyll content in N-deficient and controlled tomato.

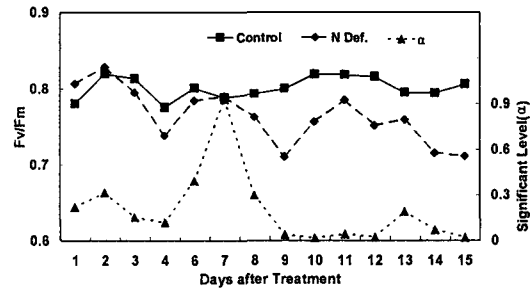


Fig. 2 Comparison of photosynthetic efficiency (Fv/Fm) in N- deficient and controlled tomato.

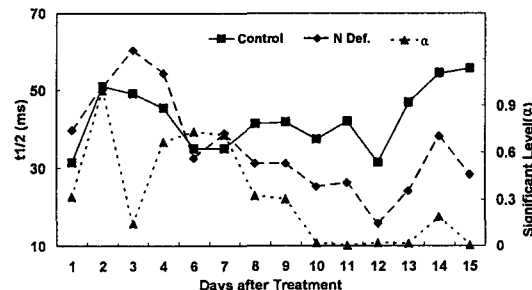


Fig. 3 Comparison of half rise time($t_{1/2}$) in N- deficient and controlled tomato.

다. 적외선 엽온 측정기

엽온을 이용한 N 결핍 토마토의 진단 가능성을 확인하고자 N 결핍 처리구와 대조구를 대상으로 적외선 엽온 측정기를 사용하여 DT 측정결과를 예시한 것은 그림 4와 같다.

N 결핍 장애는 대조구와 처리구의 DT가 $-7 \sim 0$ °C 범위의 값으로 처리 경과 일수에 따라 경향이 불분명하였다. 따라서 엽온

을 이용한 N 결핍 장애 진단은 불가능한 것을 알 수 있었다. 그러나 대조구 비교법에 의한 P 결핍 장애진단은 적중률 70 % 수준에서 최초진단가능일이 1 ~ 2 일 정도면 진단이 가능하였고, Ca 결핍 장애진단은 적중률 60 % 수준에서 최초진단가능일이 1 ~ 4 일 정도면 가능하였다.

라. 기공 저항측정기

기공 저항측정기로부터 측정한 기공저항은 정상 상태의 식물체에 비하여 생육장애를 받고 있는 식물체의 기공저항이 높아지므로 이를 이용하여 식물체의 생육장애 여부를 확인할 수 있다. 그리고 증산과 기공저항의 관계는 음의 상관관계를 가지고 있다.

N 결핍 처리구와 대조구 토마토의 증산과 기공 저항 측정결과를 예시한 것은 그림 5, 6과 같다. N 결핍 장애의 대조구 비교법에 의한 진단은 적중률 55 % 수준에서 최초진단가능일이 1 ~ 7 일 정도면 가능하였고, P 결핍 진단은 적중률 80 % 수준에서 최초진단가능일이 5 ~ 7 일 정도면 가능하였다.

Ca 결핍은 최초진단가능일이 2 ~ 8 일 정도면 적중률 65 % 수준으로 진단이 가능하였다.

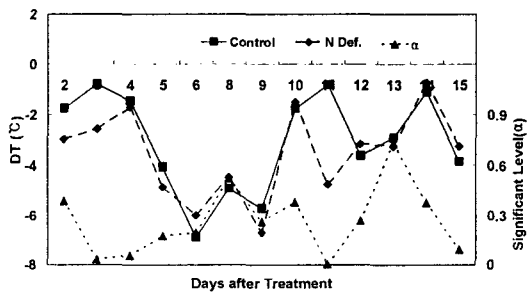


Fig. 4 Comparison of DT in N-deficient and controlled tomato.

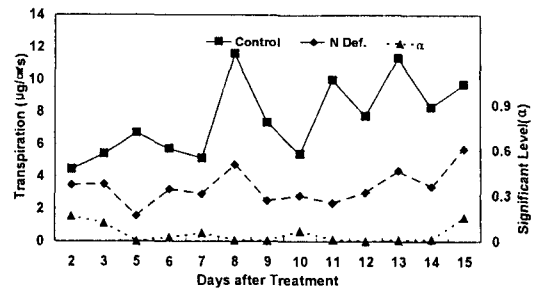


Fig. 5 Comparison of transpiration in N-deficient and controlled tomato.

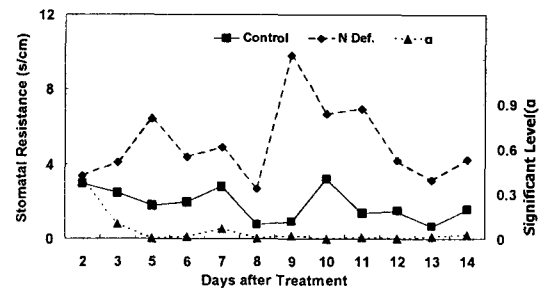


Fig. 6 Comparison of stomatal resistance in N-deficient and controlled tomato.

마. 근적외선 분광분석기

분광분석기로 얻은 흡광도 스펙트럼 자료는 측정 범위 400 ~ 2500 nm 내에서 2 nm 간격으로 수집한 것이므로 스펙트럼 자료는 1050 개의 수치로 구성된 것이다. 대조구 비교법에 의한 N 결핍 장애 진단에 민감한 파장대는 504 ~ 520 nm, 522 ~ 646 nm, 648 ~ 658 nm, 688 ~ 750 nm의 4 개 대역으로 선정되었다. 선정된 파장대역에서 중심파장은 512, 560, 652, 718 nm 이다.

P 결핍 장애 진단에 민감한 파장대는 438 ~ 506 nm, 1100 ~ 1134 nm의 2 개 대역으로 선정되었으며, 선정된 파장대역에서 중심파장은 472, 1116 nm로 나타났다.

Ca 결핍 장애 진단에 민감한 파장대는 490 ~ 508 nm, 526 ~ 592 nm, 594 ~ 604 nm, 694 ~ 730 nm의 4 개 대역으로 선정되었으며, 선정된 파장대역에서 중심파장은 500, 560, 600, 712 nm이다.

이상의 결과를 종합하면, N 결핍 장애에 민감한 파장대중에서 560, 718 nm는 적중률 80 % 수준에서 최초진단가능일이 빠르면 4 일, 늦어도 6 일 정도면 진단이 가능하였다. 여기서 N 결핍 처리구와 대조구 토마토 잎의 560 nm 흡광도 변화를 예시한 것은 그림 7과 같다.

Ca 결핍 장애에 민감한 파장대중에서 560, 600, 712 nm는 적중률 80 % 수준에서 최초진단가능일이 2 ~ 7 일 정도면 진단이 가능하였으며, P 결핍 장애진단에 민감한 파장대는 65 % 수준에서 최초진단가능일이 8 ~ 12 일로 다른 장애보다 비교적 늦게 진단이 가능하였다.

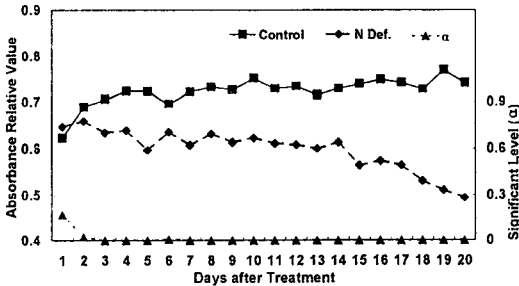


Fig. 7 Comparison of light absorbance in N-deficient and controlled tomato at a wavelength of 560nm.

바. 다과장 복사계

N 결핍 장애 처리구와 대조구 토마토를 4 가지 파장대(중심파장 485, 560, 660, 830 nm)에서 관찰한 결과, 중심파장 830 nm를 제외한 나머지 3 종 파장대의 관측결과는 처리 후 4 일째부터 유의수준 1 % 미만의 고도의 유의차를 보였으며, 그 현상은 그림 8 과 같이 20 일째 관찰일 까지 계속되어 사용한 다과장 복사계가 N 결핍 장애 진단에 매우 유용한 기기임을 알 수 있었다.

Ca 결핍 장애 토마토도 정상 생육 토마토와 재배하며 전술한 파장대에서 관찰한 결과 중심파장 830 nm를 제외한 나머지 3 종 파장대의 관측결과 처리 후 5 일째부터 유의수준 5 % 미만의 유의차를 보였으며, 그

현상은 N 결핍 장애 토마토와 마찬가지로 20 일째 관찰 일까지 계속되어 사용한 다과장 복사계가 Ca 결핍 장애 진단에도 매우 유용한 기기임을 알 수 있었다.

마. Canopy analyzer

N 결핍 처리구와 대조구의 처리 경과 일수에 따른 엽면적 지수(leaf area index)변화는 처리 7 일째부터 처리구와 대조구간에 명백한 차이를 보임으로서 canopy analyzer 도 N 결핍 장애 진단에 유용한 기기임을 알 수 있었으며, 이러한 현상은 Ca 결핍 장애 토마토에서도 매우 유사한 결과를 보였다.

Canopy analyzer의 진단 능력을 전술한 다과장 복사계와 비교하면 다과장 복사계의 진단능력이 조기진단의 관점에서 더 우수함을 알 수 있었다.

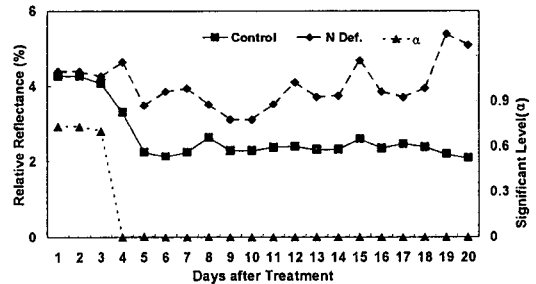


Fig. 8 Comparison of relative reflectance in N-deficient and controlled tomato at a wavelength 660 nm by MSR.

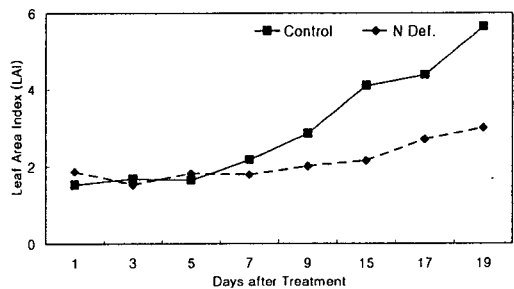


Fig. 9 Comparison of leaf area index in N-deficient and controlled tomato.

4. 요약 및 결론

토마토를 공시재료로 하여, 생육 중인 식물 잎으로부터 비교적 신속하게 생체정보 수집이 가능한 비파괴 계측기인 엽록소 측정기, 엽록소 형광측정기, 적외선 엽온측정기, 기공 저항측정기, 근적외선 분광분석기, 다파장 복사계, canopy analyzer를 이용하여 N, P, Ca 결핍 장애 토마토의 조기 진단 가능성 여부와 그 유용한 정도를 파악하기 위하여 수행한 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

가. N 결핍 장애진단이 가능한 계측기는 엽록소 측정기, 엽록소 형광측정기, 기공 저항측정기, 근적외선 분광분석기이다. 여기서 조기 진단가능성으로 볼 때 근적외선 분광분석기가 높은 정확도의 진단이 가능한 것으로 나타났으며, 중심파장이 560, 718 nm는 적중률 80 % 수준에서 최초진단가능일이 4 ~ 6 일 정도면 진단이 가능하였다.

나. P 결핍 장애진단이 가능한 계측기는 적외선 엽온측정기, 기공 저항측정기, 근적외선 분광분석기이다. 여기서 적외선 엽온측정기는 적중률 70 % 수준에서 최초진단가능일이 1 ~ 2 일 정도로 진단가능성이 비교적 높게 나타났다.

다. Ca 결핍 장애진단이 가능한 계측기는 엽록소측정기, 적외선 엽온측정기, 기공 저항측정기, 근적외선 분광분석기이다. 근적외선 분광분석기는 560, 600, 712 nm에서 높은 정확도의 진단이 가능하였으며, N 결핍 장애진단에 민감한 파장대와 유사하게 나타났다.

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

5. 참고문헌

1. 성제훈. 1998. 오이 생육장애의 비파괴 진단법 개발. 박사학위논문. 전남대학교.
2. 류육성. 2000. 토마토의 생체계측과 생육장애 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. Buschmann Claus, et al. 1994. Spectrometer for fast measurements of in vivo reflectance, absorptance, and fluorescence in the visible and near-infrared. Remote Sensing Environ. 48:18-24.
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. Casady, W.W., N. Singh, & T.A. Costello. 1996. Machine vision for measurement of rice canopy dimensions. Trans. of the ASAE. 39(5):1891-1898.
7. 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.
8. Lichtenthaler, H. K. and U. Rinderle. 1988. The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants. CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry 19(Sep.):S29-S85.