

오이의 질소결핍 장애 진단을 위한 생체정보 수집

In-vivo Measurement of Cucumber to Detect N-Deficient Stress

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

1. 서론

작물의 생육장애 진단은 식물체의 계측에 의해 수행되는데, 이러한 계측은 생육 중인 작물을 대상으로 할 경우, 작물의 잎이나 줄기의 비파괴적 생체(in-vivo)계측을 필요로 하며 비접촉이면 더욱 바람직하다. 그리고 식물체의 건강상태를 좀더 신속하고 정확히 파악하기 위해서는 가능한 다양한 항목을 측정 대상으로 하여 관찰하는 것이 요구될 뿐만 아니라 많은 경우 그 관찰은 미소한 성장반응 및 성장량을 측정하여야 하므로 상당히 높은 정확도의 전문 센서가 필요하다.

본 연구는 생육중인 작물에서 발생하는 주요 생육장애를 조기에 진단할 수 있는 계측기의 선택 또는 생육장애 진단기를 개발하는 자료를 확보하기 위한 기초연구로서, 질소 결핍 장애가 있는 오이를 공시재료로 하여, 식물 잎으로부터 비교적 짧은 시간에 생체정보 수집이 가능한 주요 비파괴 계측기를 대상으로 각 측정별 질소 결핍장애의 조기 진단 가능성 여부와 그 유용한 정도를 파악하기 위한 목적을 갖고 수행하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험 재료 및 사용기기

(1) 실험 재료

실험대상 작물인 오이(*Cucumis sativus* L.)는 훈탄을 담은 플라스틱 상자에 파종하였고, 발아 후 본엽이 2 매 전개될 때까지 키운 후, 자연광을 받는 플라스틱 온실내의 양액재배상에 이식하여 양액재배 방식으로 생육하였다. 오이 묘는 본엽이 4 매 이상 전개될 때까지 성장시켜 온실환경과 양액재배에 순화시킨 후 실험에 사용하였다.

실험은 질소결핍 장애를 준 오이(처리구)와 정상생육 오이(대조구)를 동시에 비교 관찰하는 방법으로 수행하였다. 양액재배시 사용한 양액은 3 차 증류수에 기본적으로 Cooper 양액 조성법(Cooper 양액은 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, MgSO_4 , KNO_3 , KH_2PO_4 , Fe EDTA, MnSO_4 , H_3BO_4 , CuSO_4 , Na_2MoO_4 의 혼합액)을 적용하되 처리구 오이의 양액은 질소 성분이 포함된 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 와 KNO_3 를 완전히 배제하여 조성하였다.

양액재배시 지하부의 환경을 균일하게 하기 위해 양액 통에는 공기펌프를 설치하여 공기를 공급하였다. 배양액은 오이의 양분 흡수정도가 영양분의 종류에 따라 달라 배양액의 조성이 변하기 때문에 2 ~ 3 일 간격으로 교환하였다.

(2) 실험 기기

식물체의 계측의 주요 측정대상을 보면, 생리반응의 경우는 광합성, 호흡 증산, 전류 및 기공 개도 등을 들 수 있고, 성장량의 경우에는 전중량, 부분중량, 체적, 높이 및 줄기의 직

* 농업기계화연구소

** 전남대학교 농과대학 농공학과

*** 전남대학교 농과대학 응용식물학부

경 등이며, 생육상태의 경우에는 엽의 온도, 함수량, 색조 및 품질 등이 있다. 지금까지 식물의 생리 또는 생육정보 수집을 목적으로 10 여종의 비파괴 계측기가 개발되어 사용되고 있는데, 본 연구에서는 이 중 식물체 잎을 대상으로하여 비교적 짧은 시간에 생체정보 수집이 가능한 엽록소 측정기(Chlorophyll meter, Minolta Co. Ltd., Japan, model SPAD-502), 엽록소 형광측정기 (Chlorophyll fluorescence measurement system, Morgan Scientific Inc. USA, model CF-1000), 적외선 엽온측정기 (Infrared AG multimeter, Everest Interscience, Inc. USA, model 510B), 3 가지 기기와 최근 소개된 비파괴 접촉형의 분광분석기(Spectrophotometer ; NIRSystem, Perstorp Analytical, Inc., USA, model 6500)를 사용하여 식물체의 생육장해를 조기에 진단하는 기술을 개발하고자 하였다.

나. 실험 방법

실험은 4월부터 6월 중 각각 20일간 2 회(1차와 2차 실험) 반복하였고, 분광분석실험 결과를 확인하기 위하여 다음 해 6월 중 14일간 수행(3차 실험)하였다. 각 실험에 있어 처리구와 대조구의 오이 묘는 각각 3그루 씩 재배하였으며, 각 그루의 오이에 대해서는 엽령이 10 - 15일 정도로서 약간 성숙한 2장의 잎을 대상으로 전술한 측정기를 사용하여 각 조사항목을 매일 12:00 - 14:00 사이 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 엽록소 측정

질소 결핍 처리구와 대조구를 대상으로 오이 잎의 엽록소 함량을 측정한 결과는 그림 1과 같다. 그림에서 유의수준(α)은 처리구와 대조구간의 유의차를 t-검정(MS-Excell 사용)하여 구한 유의수준이다. 그림과 같이 질소 결핍 오이 잎의 엽록소 함량은 50 ± 5 SPAD 범위에서 대체로 일정한 수준을 유지하였으나 대조구 오이 잎의 엽록소 함량은 처리 일수 경과에 따라 점차 감소하는 경향이 뚜렷하였으며 이러한 경향은 1차 실험과 2차 실험 공히 유사한 결과를 보였고, 이러한 결과는 유의수준으로 나타낸 t 검정 결과로부터 확인할 수 있었다.

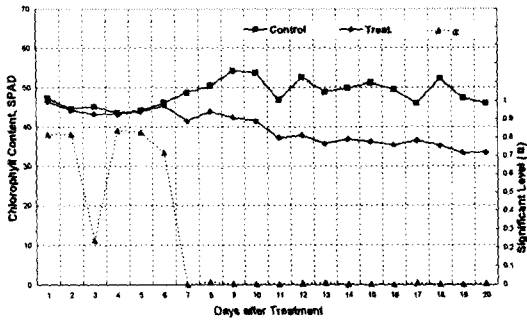
식물체 잎의 질소 성분이 부족할 경우 잎은 엽록소 부족과 증산 효과 저하로 황화현상을 나타내므로 식물체의 질소 결핍 장애 여부는 잎의 엽록소 함량으로 판단할 수 있을 것으로 예상되었는데 본 실험 결과는 이를 증명한 한 것이다. 이러한 결과로 보아 오이의 질소 결핍 장애는 엽록소 함량 측정값으로 진단할 수 있음을 알 수 있었다. 즉, 질소 결핍 오이 잎의 엽록소 함량은 45 SPAD 이하로서 판단할 수 있고, 이에 의한 질소 결핍 장애의 진단은 장애 발생 후 빠르면 3일 늦어도 7-9일이면 확인할 수 있음을 알 수 있었다.

나. 엽록소 형광 측정

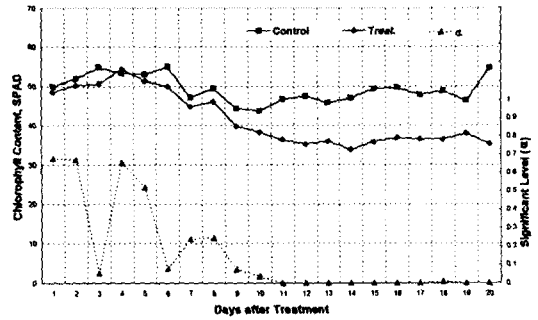
엽록소 형광측정기로부터 구한 F_v/F_m 의 값은 광합성 효율을 나타내는 지수로서 정상 상태의 식물체에 비하여 상육장애를 받고 있는 식물체의 F_v/F_m 값은 낮으므로 이를 이용하여 식물체의 생육장애 여부를 확인할 수 있다. 질소 결핍 처리구와 대조구를 대상으로 F_v/F_m (광합성 효율)을 측정한 결과는 그림 2와 같다.

그림과 같이 1차 실험시 질소 결핍처리 오이는 대조구 오이에 비하여 처리 후 시간이 경과함에 따라 광합성 효율이 낮아졌음을 알 수 있었다. 2차 실험의 경우는 1차 실험의 결과와 비슷한 경향을 파악할 수는 있었으나 그 결과는 1차 실험에 비하여 약간 불분명하였다. 그러나 두 실험결과를 종합하면, 엽록소 형광 측정에 의해 질소 결핍장애의 진단은 5 % 유의수준에서 가능하고 그 진단은 2차 실험 결과와 같이 장애발생 후 빠르면 5 일째부터 가능

하며, 장애 발생 후 시간이 경과함에 따라 전술한 엽록소 함량과 같이 진단 가능성의 확률이 높아지는 것으로 판단되었다. 따라서 엽록소 형광 측정에 의한 오이의 질소 결핍장애 진단은 엽록소 함량 측정에 의한 진단보다는 우수하지 못한 것으로 판단되었다.

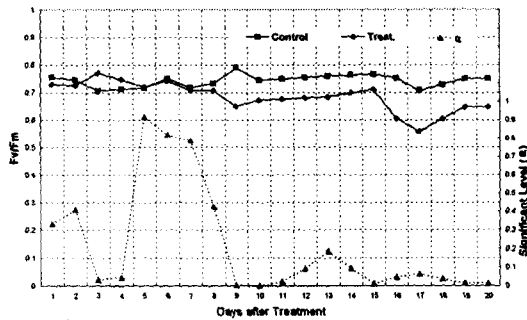


(a) 1st Test

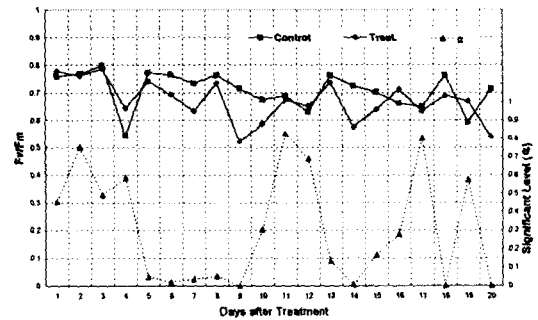


(b) 2nd Test

Fig. 1. Comparison of the chlorophyll content in N-deficient and controlled cucumbers during the two test periods



(a) 1st Test



(b) 2nd Test

Fig. 2. Comparison of photosynthetic efficiency (Fv/Fm) of N-deficient and controlled cucumbers during the two test periods

다. 엽온 측정

식물체가 정상적으로 탄소동화작용을 할 때 엽온은 대기온 보다 3 ~ 10 °C 낮으며 생육 장애를 받을 경우 엽온은 장애 정도가 심할수록 대기온에 접근한다. 이를 이용하여 질소 결핍 오이 진단법을 찾고자 질소 결핍 처리구와 대조구를 대상으로 적외선 엽온측정기를 사용하여 대기온-엽온차를 측정된 결과, 처리구나 대조구 오이의 대기-엽온차는 상당한 범위에서 변화하여 일정한 추세를 파악하기 어려우나 전반적인 추세는 처리구의 대기-엽온차가 대조구의 것에 비하여 높은 경향을 보였다. t-검정 결과 양자간 5 % 유의수준에서 유의차를 보인 날자 수나 유의차를 나타내기 시작한 일자도 1차 시험과 2차 시험에 있어 일정한 경향을 보이지 않았다. 따라서 대기-엽온차로서 질소 결핍 생육장애를 명확하게 진단하는 것은 불가능한 것으로 판단되었다.

라. 분광분석

(1) 질소 결핍 진단에 민감한 파장대 결정

측정범위가 400 nm ~ 2400 nm인 NIRSystem 분광분석기의 수집자료 분석에 있어, 본

연구에서는 우선 질소 결핍 진단에 민감한 광 파장대를 흡광도 측정자료와 그 2차 미분 자료로 부터 다음과 같이 결정하였다.

분광분석기의 실험자료는 전술한 측정 범위 내에서 2 nm 간격으로 수집한 오이 잎의 흡광도 자료이다. 수집한 자료로부터 질소 결핍 처리구와 대조구간의 유의성을 1000 개의 각 측정 광 파장별로 t 검정으로 분석하였으며 그 결과는 유의성 수준으로 구하였다. 이러한 분석은 전 실험기간에 수집한 모든 자료에 대하여 수행하였으며, 따라서 그 결과는 실험일자와 광 파장별의 2차원 배열이었다. 본 연구에서는 측정 광 파장별로 측정일 경과에 따른 처리구와 대조구간의 유의수준 변화를 조사하여 비교적 조기에 높은 유의수준을 나타내고 그 유의수준을 계속해서 유지하는 광 파장대를 질소 결핍 장애 진단에 민감한 광 파장대로 결정하였다. 본 연구의 3 회에 걸친 실험에서 구한 결과는 표 1과 같다. 표와 같이 오이 잎의 흡광도 분석에 의한 질소 결핍 진단의 민감 파장대는 3개 군으로 구분되며, 각 군의 중심파장(해당 파장대내의 대표적 파장) 개략적으로 570 nm, 710 nm, 1540 nm로 판단되었다.

Table 1. Obtained bands of sensitive wavelength to detect N deficient cucumber from the spectrophotometric absorbance observation

Sensitive Band (nm)	Center Wave Length (nm)	Resulted Experiment
514 - 638	570	1st, 2nd, 3rd
686 - 752	710	2nd, 3rd
1344 - 1876	1540	3rd

분광분석 측정자료는 광 파장에 대한 연속의 흡광도(혹은 반사도) 함수로서 그 분석의 주요 방법 중 하나는 입수한 흡광도 자료의 1차 또는 2차 도함수를 구하여 그 도함수의 특성과 측정한 물체의 물리 화학적 또는 생물학적 특성간의 관계를 찾는 방법이다. 본 연구에서는 질소 결핍 처리구와 대조구 오이로 부터 입수한 흡광도 실험자료의 2차 미분 결과를 위에서 설명한 흡광도 분석 방법과 마찬가지로 분석하여 질소 결핍 장애 진단에 민감한 광 파장대를 구하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

(2) 분광분석에 의한 질소 결핍 진단

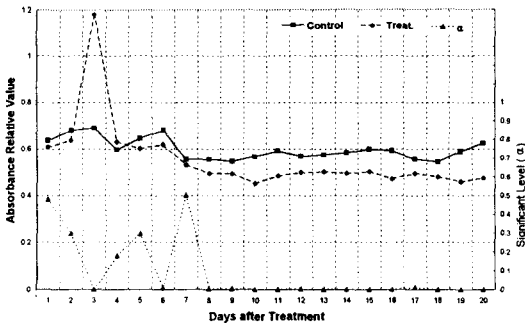
2차 실험시 처리구와 대조구 오이를 중심파장 570 nm와 710 nm에서 관찰한 흡광도 변화는 그림 3과 같다. 그림과 같이 질소 결핍 오이는 대조구 오이에 비하여 흡광도가 낮은 경향이 분명하며 t 검정 결과 그 유의수준 570 nm와 710 nm는 공히 처리 3일째부터 5 % 미만으로 나타났다. 이러한 결과는 1차 실험과 3차 실험에서도 비슷한 결과로서 질소 결핍 장애는 중심파장 570 nm와 710 nm에서 수집한 흡광도 자료에 의해 장애 부과 후 3 - 4 일째부터 그 진단이 가능함을 알 수 있었다.

2차 실험시 처리구와 대조구 오이를 중심파장 670 nm와 750 nm에서 관찰한 흡광도의 2차 도함수의 한 예는 그림 4와 같다. 그림과 같이 질소 결핍 오이는 대조구 오이간에는 유의차가 분명하며 t 검정 결과 그 유의수준 670 nm와 750 nm는 각각 처리 5일과 8일째부터 5 % 미만으로 나타났다. 이러한 결과는 2차 실험의 경우 표 2에 명시한 다른 광 파장에서 진단가능 최초일에는 차이가 있으나 전반적으로 위와 비슷한 결과이고 이는 1차 실험과 3차 실험에서도 같은 결과였다. 결과적으로 흡광도 2차 도함수의 몇 민감 파장에 의해서 질소결핍 장애의 진단은 가능하고, 그 진단의 최초 일자는 흡광도에 의한 진단보다 약간 늦은 것

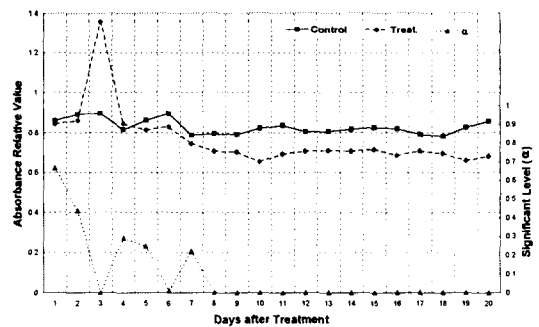
으로 판단되었다.

Table 2. Obtained bands of sensitive wavelength to detect N deficient cucumber from the 2nd derivative of the spectrophotometric absorbance observation

Sensitive Band (nm)	Center Wave Length (nm)	Resulted Experiment
502 - 512	506	1st, 2nd
530 - 546	540	1st, 2nd
620 - 640	636	1st, 2nd, 3rd
652 - 686	670	1st, 2nd, 3rd
694 - 714	706	1st, 2nd, 3rd
726 - 774	750	1st, 2nd, 3rd
924 - 988	960	3rd
1050 - 1058	1052	3rd
1098 - 1136	1116	3rd
1144 - 1194	1180	3rd
1290 - 1390	1350	3rd
1398 - 1492	1410 or 1456	3rd
1540 - 1626	1596	1st, 2nd, 3rd
1814 - 1946	1922	3rd
2004 - 2030	2014	3rd

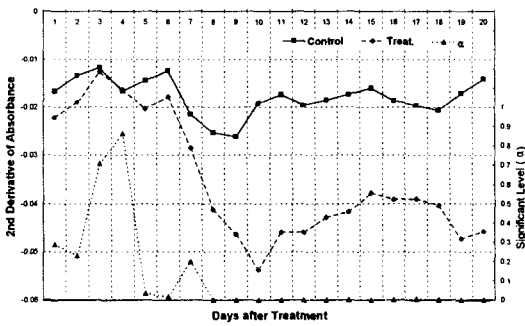


(a) Wavelength 570 nm

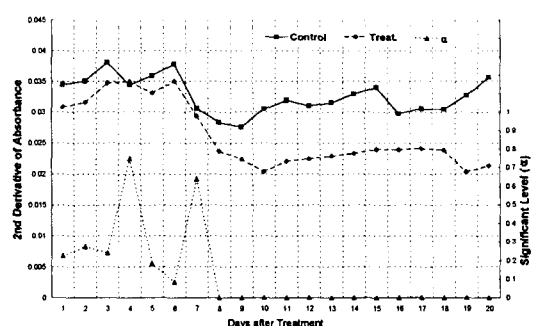


(b) Wavelength 710 nm

Fig. 3. Comparison of light absorbance from cucumbers of N-deficient and controlled during the 1st test periods



(a) Wavelength 670 nm



(b) Wavelength 750 nm

Fig. 4. Comparison of light absorbance from cucumbers of N-deficient and controlled during the 1st test periods

4. 결론

오이를 공시재료로 하여, 생육 중인 식물잎으로부터 비교적 짧은 시간에 생체정보 수집이 가능한 비파괴 계측기인 엽록소 측정기, 엽록소 형광측정기, 적외선 엽온측정기, 접촉형의 분광분석기를 이용하여 질소 결핍장애 오이의 조기 진단 가능성 여부와 그 유용한 정도를 파악하기 위하여 수행한 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

가. 엽록소 측정기의 측정값으로서 질소 결핍장애 오이의 진단은 엽록소 함량 45 SPAD 이하 여부로서 판단할 수 있고, 이에 의한 질소 결핍 장애의 진단은 장애 발생 후 빠르면 3일 늦어도 7 - 9일이면 확인할 수 있다.

나. 엽록소 형광 측정에 의해 질소 결핍장애 오이의 진단은 가능하고 그 진단은 장애 발생 후 빠르면 5 일째부터 가능하며, 이에 의한 오이의 질소 결핍장애 진단은 엽록소 함량 측정에 의한 진단보다는 우수하지 못하다. 그리고 대기-엽온차에 의해 질소 결핍장애 오이의 진단은 불가능한 것으로 판단되었다.

다. 분광분석기의 흡광도 분석에 의한 질소 결핍 진단의 민감 파장대의 대체적 중심파장은 570 nm, 710 nm, 1540 nm이고, 흡광도 2차 도함수에 의한 진단의 민감 파장대와 중심파장은 표 2와 같이 흡광도의 경우보다 많은 것으로 분석되었다.

라. 분광분석기에 의한 질소 결핍장애 오이의 진단은 흡광도 자료나 그 2차 도함수에 의해 가능하고, 그 진단은 흡광도의 경우 장애발생 후 빠르면 3 일째부터 가능하며, 흡광도 2차 도함수에 의한 진단의 최초 일자 는 흡광도에 의한 진단보다 약간 늦은 것으로 판단되었다.

5. 참고문헌

1. Bausch, W. C. and H. R. Duke. 1996. Remote sensing of plant nitrogen status in corn. *Trans. of the ASAE*. 39(5):1869-1875.
2. Blackmer, T. M., J. S. Schepers, and G. E. Varvel. 1994. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. *Agron. J.* 86:934-938.
3. 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.
4. Giltenson, A.A., M.N. Merzlyak and H.K. Lichtenthaler. 1996. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *J. Plant Physiology* 148:501-508.
5. 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.
6. Lichtenthaler, H. K., et al. 1998. Plant stress detection by reflectance and fluorescence. *Annals of New York Academy of Sciences*. 455-469.