

질소결핍 오이의 비파괴 진단법 비교

Comparison of Non-destructive Method to Detect Nitrogen Deficient Cucumber

성 제 훈*	서 상 룡**	류 욱 성**	정 갑 채***
정회원	정회원	정회원	
J. H. Sung	S. R. Suh	Y. S. Ryu	G. C. Chung

ABSTRACT

Some stress for a plant could be detected to a certain degree by plant physiological measuring technique of the state of the art. The capability of early detection of any measuring system depends on kind of plant and kind and level of stress. The objectives of this study were to evaluate the capability of several fast and intact type plant stress detection systems to detect nitrogen deficiency of cucumber in the field. A series of experiment was carried out with four kinds of intact type measuring devices - a chlorophyll content meter, a chlorophyll fluorescence measurement system, an infrared thermometer and an optical spectrometer.

The experiments resulted that the chlorophyll content meter could detect the stress of N deficiency at a confidence level higher than 95% on 3rd day for the earliest case and the detection of high precision was possible from 7th day after the stress was applied. The chlorophyll fluorescence measurement system detected the stress at a confidence level higher than 95% on 3rd day for the earliest case but the detection was not as much precise as the chlorophyll content meter. Leaf temperature measurement noted very poor results to detect the stress. Using the spectrometer, sensitive wavelength regions to detect the stress were searched and found out as 562~564 nm, 700~724 nm and 1,886~1,894 nm. With the spectrometer using any of wavelength within the sensitive wavelength region, detection of the stress at a confidence level higher than 95% was possible from 3rd or 4th day after the stress was applied.

주요용어(Key Words): 질소결핍(Nitrogen deficient), 오이(Cucumber), 비파괴(Non-destructive), 장해 진단 (Detection of stress)

1. 서 론

재배 중인 작물의 생육상태를 정확히 진단하는 것은 농업 종사자의 오랜 염원이다. 그간 작물 재배학이나 식물생리학적 지식의 꾸준한 발전으로 주요 식량 작물 또는 수목의 몇 가지 영양장해 또는 환경장해의 진단은 어느 정도까지 가능하다. 이러한 기술

은 식물체 잎의 면적 또는 온도, 엽록소 함량과 엽록소의 형광 특성, 잎의 광학적 특성, 기공저항, 증발산량과 수압 특성, 잎의 화학적 조성분, 식물 즙액(sap)의 유동율, 잎과 뿌리 부분의 건물량 등의 항목 중 일부를 관측하여 진단하는 방법이다 (Percy 등, 1989).

재배 중인 작물의 경우 이러한 관측은 작물의 잎

* 농업기계화연구소

** 전남대학교 농과대학 농공학과

*** 전남대학교 농과대학 응용식물학부

이나 줄기로부터 신속한 생체(*in-vivo*) 계측이 요구되며 비접촉이면 더욱 바람직하고, 그 측정 결과는 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. 현재 이러한 구비요건을 갖춘 수준의 측정기가 사용되고 있으며, 이의 대표적인 기기로서 엽록소 함량 측정기(*chlorophyll meter*), 엽록소 형광 측정기(*chlorophyll fluorescence meter*), 엽온 측정기(*thermometer for measuring leaf temperature*), 기공저항 측정기(*porometer*) 등을 들 수 있다.

식물 잎의 광학적 특성은 식물 생육장애 진단에 매우 유용한 수단임이 많은 연구 결과로 보고된 바 있으며(Buschmann 등, 1994; Carter, 1994; Elvidge와 Chen, 1995; Giltenson 등, 1996; Jackson 등, 1986; Lichtenthaler 등, 1998; Penuelas, 1994), 엽록소 함량 측정기와 엽록소 형광 측정기는 이를 이용한 대표적 기기이다. 엽록소 함량 측정기는 벼를 대상으로 한 기기로서 광파장 430 nm와 760 nm에서 잎의 광투과율(*transmittance*)를 측정하여 간접적인 방법으로 엽록소 함량을 측정하는 기기이다(Stone 등, 1996). 엽록소 형광 측정기는 엽록소의 형광 방사 수준을 측정하여 엽록소의 광합성 효율과 에너지 변환기구의 기능을 분석하는 기기이다(Lichtenthaler 등, 1998). 이외에 식물의 광학적 특성 관련 분야의 하나로써 식물체 잎의 광 반사(*reflectance*) 또는 전자기 복사(*electromagnetic radiation*)에 관한 기술은 최근 인공위성에 의한 원격감지(*remote sensing*)와 기계시각(*machine vision*) 관련 기술의 발달에 따라 식물의 생육장애 진단 목적으로 응용되고 있다(Bausch와 Duke, 1996; Blackmer 등, 1994; Carter 등, 1994, 1996; Casady 등, 1996; Elvidge와 Chen, 1995; Fernandez 등, 1994; Filella 등, 1995; Lichtenthaler 등, 1998; Penuelas 등, 1994, Stone 등, 1996).

이상의 식물 생육장애 진단기술의 대부분은 지금까지는 주로 식량작물이나 산림자원을 대상으로 하고 있다. 그런데 이러한 잎의 광학적 특성을 이용한 식물 생육장애 진단기술은 원예작물에도 접목하여

사용할 수 있을 것이고, 관련 기술이 개발될 경우 작물의 생육장애 여부를 조기에 진단할 수 있으므로 안정적인 원예작물 생산에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

식물 잎의 광반사 또는 복사 특성을 이용한 식물 생육장애 진단기술은, 먼저 생육장애에 민감한 광스펙트럼의 영역(광파장대)을 찾은 다음 이를 이용한 생육장애 진단의 빠른 정도를 파악하는 것이 주요 연구내용인데, 기 보고된 연구결과(Blackmer 등, 1994; Carter 등, 1994, 1996; Fernandez 등, 1994; Filella 등, 1995; Penuelas 등, 1994)에 의하면 이 민감 파장영역과 조기 진단의 정도는 식물의 종류와 생육장애의 종류에 따라 차이가 있다. 그리고 위에서 설명한 생체정보 수집용 계측기의 생육장애 진단 능력 또한 관측 대상 식물의 종류와 생육장애의 종류에 따라 차이가 있다. 따라서 특정한 작물의 특정 생육장애를 진단하기 위해서는 그에 대한 적절한 관측방법의 선택이 요구된다.

이에 따라 본 연구는 국내 주요 원예작물인 오이를 공시재료로 하고 일차적으로 질소 결핍장애를 대상으로 하여 이를 조기에 진단할 수 있는 관측방법을 결정하기 위하여, 첫째 기존의 식물 생리학적 측정기 중 생체정보 수집이 가능하고 사용이 편리한 측정기를 사용하여 조기진단의 가능성과 그 수준을 파악하고, 둘째 질소 결핍장애 진단에 민감한 광 파장대를 구한 다음 이 민감 파장대의 질소 결핍장애 조기진단의 수준을 찾는 목적을 갖고 수행하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험 재료와 사용 기기

(1) 실험 재료

실험대상 작물인 오이(*Cucumis sativus* L.)는 훈타를 담은 플라스틱 상자에 파종하였고, 발아 후 본엽이 2매 전개될 때까지 키운 후, 자연광을 받는 플라스틱 온실내에 20리터 용량의 양액재배상자에 각 3주씩 이식하여 양액재배 방식으로 생육하였다. 오이

묘는 본엽이 4매 이상 전개될 때까지 성장시켜 온실 환경과 양액재배에 순화시킨 후 실험하였다.

실험은 질소결핍 장애를 준 오이(처리구)와 정상 생육 오이(대조구)를 동시에 비교 관찰하는 방법으로 수행하였다. 양액재배시 사용한 양액은 3차 증류수에 기본적으로 Cooper 양액 조성법(Cooper, 1975 : 양액은 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, MgSO_4 , KNO_3 , KH_2PO_4 , FeNaEDTA , MnSO_4 , H_3BO_3 , CuSO_4 , Na_2MoO_4 의 혼합액)을 적용하되 처리구 오이의 양액은 질소 성분이 포함된 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 와 KNO_3 는 배제하고 배제된 Ca 성분은 CaCl_2 를 추가하여 조성하였다.

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

(2) 실험 기기

식물의 생리 또는 생육정보 수집을 목적으로 사용되고 있는 다양한 측정기 중 짧은 시간내에 생체정보 수집이 가능한 측정기로서 본 연구에서 선택하여 사용한 측정기는 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)의 3가지 기기였다. 본 연구에서 사용한 적외선 엽온측정기는, 식물체가 정상적으로 탄소동화작용을 할 경우 잎의 증발산에 의한 열에너지 소비(Pearcy, 1989)로 엽온은 대기온 보다 낮아지는데(온도차의 정도는 식물의 상태와 일조량에 따라 다르나 보통 3~6°C), 식물이 생육 장애를 받을 경우 장애 정도가 심할수록 엽온은 대기온에 접근하는 현상을 이용하여 식물의 생육장애를 진단하도록 개발된 측정기이다.

오이 잎의 광반사 특성을 이용하여 질소 결핍장애를 진단하고자 질소 결핍장애에 민감한 광 파장대를

구한 다음 이 민감 파장대에서 질소 결핍장애 조기 진단의 수준을 파악하기 위하여 비파괴 접촉형의 분광분석기(Spectrometer; Perstorp Analytical, Inc., NIRSystems, USA, model 6500)를 사용하였으며 이의 감지용 센서는 광섬유를 이용한 Interactance Reflectance Assembly를 사용하였다. 이 기기는 측정범위 400 nm~2,400 nm에서 2 nm 간격으로 Beer와 Lambert 법칙(Merva, 1995)을 응용하여 고체와 액체의 흡광도(absorbance) 스펙트럼 자료를 수집하는 기기이다. 본 기로부터 수집한 흡광도 자료는 관련 소프트웨어에 의해 반사율(reflectance) 자료로 변환할 수 있다.

나. 실험 방법

실험은 광주시 소재 전남대학교 실험포장에서 4월부터 6월중 각각 20일간 2회(1차와 2차 실험) 반복하였고, 분광분석기를 이용한 오이의 질소 결핍장애 조기진단의 수준을 파악하기 위한 실험은 다음해 6월중 14일간(3차 실험) 재수행하였다. 각 실험에 있어 처리구와 대조구의 오이 묘는 각각 3그룹씩 재배하였으며, 각 그룹의 오이에 대해서는 엽령이 10~15일 정도로서 약간 성숙한 2장의 잎(그림 1의 F와 G의 잎)을 대상으로 전술한 측정기를 사용하여 각

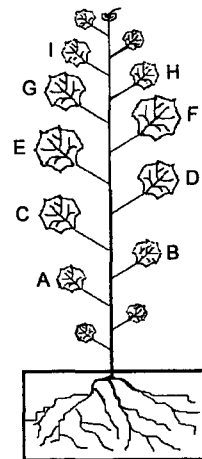


Fig. 1 Position of leaves to detect the N-deficient stress of cucumber.

조사항목을 매일 12:00~14:00 사이 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 엽록소 함량

질소 결핍 처리구와 대조구를 대상으로 오이 잎의 엽록소 함량을 측정한 결과는 그림 2와 같다. 그림에서 유의수준(α)은 처리구와 대조구간의 유의차를 t-검정(MS-Excell 사용)하여 구한 유의수준이다. 그림과 같이 대조구 오이 잎의 엽록소 함량은 50±5 SPAD 범위에서 대체로 일정한 수준을 유지하였으나 질소 결핍 오이 잎의 엽록소 함량은 처리 일수 경과에 따라 점차 감소하는 경향이 뚜렷하였고 이 경

향은 1차 실험과 2차 실험 공히 유사한 결과를 보였으며, 이는 t 검정으로 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 예상하였는데 본 실험 결과는 이를 확인한 것이다. 이러한 결과로 보아 오이의 질소 결핍 장애는 본 연구에서 사용한 엽록소 함량 측정기의 측정값으로 진단할 수 있음(45 SPAD 이하인 경우 질소 결핍장애로 진단)을 알 수 있었다.

엽록소 함량 측정기에 의한 질소 결핍 장애의 진단의 조기진단 수준을 최초 진단 가능일로 판단하면 그림과 같이 장애 발생 후 빠르면 3일 정도면 적중율 95% 수준의 장애 진단이 가능하고 7일 후에는 높은 정확도(precision)의 진단이 가능함을 알 수 있었다.

나. 엽록소 형광

엽록소 형광측정기로부터 측정된 Fv/Fm(variable fluorescence / maximum fluorescence)의 값은 광합성 효율을 나타내는 지수로서 정상 상태의 식물체에 비하여 생육장애를 받고 있는 식물체의 Fv/Fm 값이 낮으므로 이를 이용하여 식물체의 생육장애 여부를 확인할 수 있다(Lichtenthaler와 Rinderle, 1988). 질소 결핍 처리구와 대조구를 대상으로 Fv/Fm을 측정한 결과는 그림 3과 같다.

그림과 같이 1차 실험시 질소 결핍처리 오이는 대조구 오이에 비하여 처리 후 시간이 경과함에 따라 Fv/Fm 값이 낮아졌음을 알 수 있었다. 2차 실험의 경우는 1차 실험의 결과와 비슷한 경향이 있었으나 1차 실험 결과에 비하여 불분명한 결과였다. 두 차례의 실험결과를 종합하면, 엽록소 형광 측정에 의해 질소 결핍장애의 진단은 적중율 95% 수준에서 가능하고 그 진단은 1차 실험 결과와 같이 장애발생 후 빠르면 3일째부터 가능하며, 장애 발생 후 시간이 경과함에 따라 전술한 엽록소 함량과 같이 진단의 정확도가 높아지는 경향이 있는 것으로 나타났다. 그러나 엽록소 형광 측정에 의한 오이의 질소 결

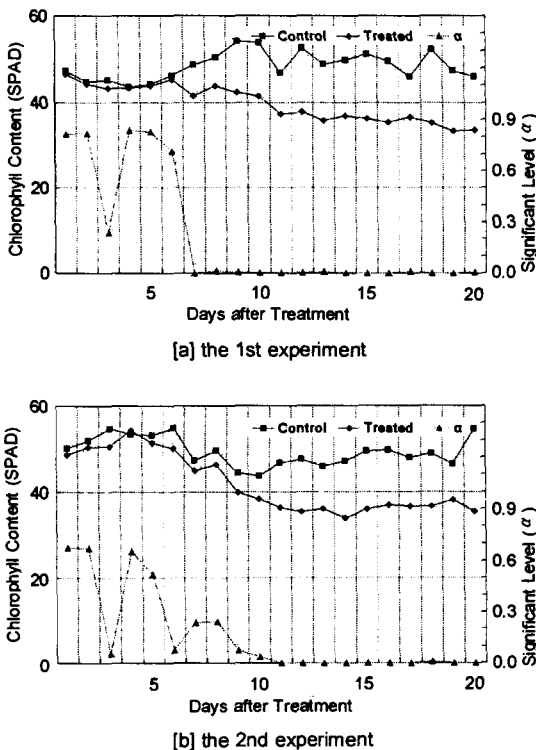
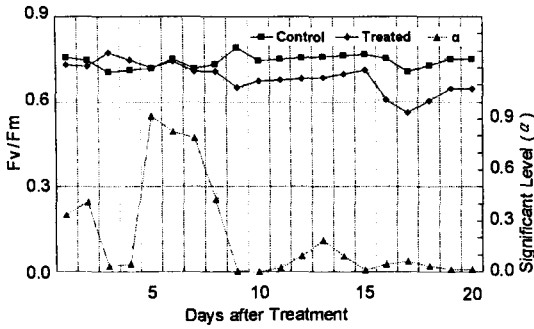
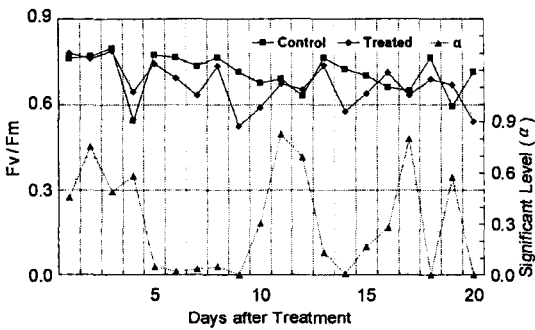


Fig. 2 Comparison of the chlorophyll content in N-deficient(Treated) and controlled (Control) cucumber leaves and the significant level(α) of their difference during the two experimental periods.



[a] the 1st experiment



[b] the 2nd experiment

Fig. 3 Comparison of the photosynthetic efficiency (F_v/F_m) of N-deficient(Treated) and controlled(Control) cucumber leaves and the significant level(α) of their difference during the two experimental periods.

필장해 진단은 엽록소 함량 측정에 의한 진단보다는 정확하지 못한 것으로 판단되었다.

다. 엽온

엽온을 이용한 질소 결핍 오이의 진단 가능성을 확인하고자 질소 결핍 처리구와 대조구를 대상으로 엽온측정기를 사용하여 엽온과 대기온과의 온도차(DT = 엽온 - 대기온)를 측정 한 결과, 처리구나 대조구 오이의 DT는 0 ~ -8°C 범위의 값으로서 대체로 처리구의 DT가 대조구의 DT에 비하여 낮은 경향이 었다. 처리구와 대조구의 유의차가 유의수준 5% 이

하인 경우도 있었으나 1차 시험과 2차 시험 공히 일정한 추세를 파악할 수가 없었다(실험 결과는 의미가 없어 제시하지 않았음). 따라서 엽온과 대기온의 차로서 질소 결핍 생육장해를 진단하는 것은 불가능한 것으로 판단되었다.

라. 분광 분석

(1) 질소 결핍 진단에 민감한 파장대 결정

분광분석기로 얻은 흡광도 스펙트럼 자료는 측정 범위 400 nm ~ 2,400 nm 내에서 2 nm 간격으로 수집한 것이 am로 각 스펙트럼의 자료는 1,000개의 수치로 구성된 것이다. 질소 결핍 진단에 민감한 파장대를 결정하기 위하여 수집한 2 nm 간격의 흡광도 스펙트럼 자료는 각 파장별로 처리구와 대조구간의 유의성을 t 검정으로 분석하였으며 그 결과는 유의성 수준으로 구하였다. 이러한 분석은 전 실험기간 동안 매일 수집한 모든 자료에 대하여 수행하고 그 결과는 실험일자와 광 파장별의 2차원 배열로 정리하였다.

본 연구에서는 측정 광 파장별로 측정일 경과에 따른 처리구와 대조구간의 유의수준 변화를 조사하여 처리 후 12일 이내에 유의수준 5% 이하를 연속해서 적어도 3일 이상 유지한 광 파장대를 신뢰할 수 있는 장해 진단에 민감한 파장대로 규정하고 이를 구하였다. 그 결과 1차 실험에서는 520 ~ 640 nm, 690 ~ 730 nm, 1,338 ~ 2,400 nm의 3개 대역, 2차 실험에서는 514 ~ 664 nm와 682 ~ 724 nm, 1,886 ~ 1,900 nm의 3개 대역, 3차 실험에서는 400 ~ 464 nm, 484 ~ 658 nm, 686 ~ 760 nm와 1,336 ~ 1,894 nm와 1,990 ~ 2,400 nm의 5개 대역으로 분석되었다. 이러한 3차례 실험에서 포착한 민감 파장대가 상이한 이유는 각 실험시 채광량과 온습도 등의 오이 생육환경 차이에 따른 생육활성도 차에 기인한 것으로 판단되었다.

이상의 결과를 종합하면, 3차례 실험에서 공통적으로 포착된 민감 파장대는 520 ~ 640 nm, 690 ~ 724 nm, 1,886 ~ 1,990 nm이다. 이 중 파장대 520 ~ 640 nm는 가시광선 영역에서 녹색과 황색 영역으로서

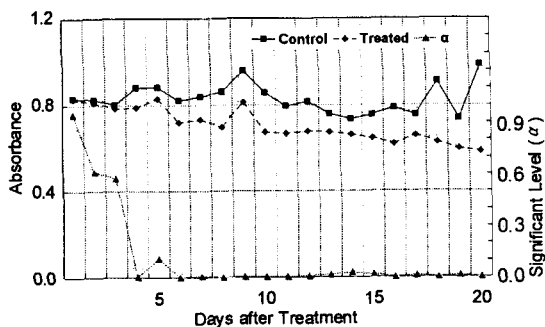
식물체 잎의 질소 성분이 부족할 경우 잎은 엽록소 부족과 증산 효과 저하로 황화현상을 나타내므로 이는 장해 진단에 민감한 파장대의 하나로 예상되었던 영역이다. 파장대 690~724 nm 영역은 식물 잎 반사율이 급격히 증가하는 red edge 영역으로서 그 변곡점의 위치가 엽록소 함량과 관계가 있음은 Carter (1993)와 Buschmann 등(1994)과 Giltenson 등(1996)에 의해 보고된 바 있으나 본 연구에서는 이 영역의 반사율도 질소결핍 진단에 유용한 것으로 나타났다. 파장대 1,886~1,990 nm 영역은 적외선 영역의 파장대로서 지금까지의 다른 연구에서 보고된 바 없는 민감 파장대이다.

위에서 구한 각 민감 파장대역 내에서도 가장 민감한 파장영역을 결정하고자 각 파장대역내 각 파장의 최초 진단 가능일(위에서 설명한 기준으로서 처리구와 대조구간 유의수준 5% 이하를 연속해서 적어도 3일 이상 유지한 기간의 첫째 날)을 구하여 비교하였다. 세 차례의 실험자료를 종합한 결과, 파장대역 520~640 nm에서는 562~564 nm(중심파장 : 563 nm)가 가장 민감한 파장으로 분석되었는데, 이는 Blackmer 등(1994)이 옥수수를 대상으로 한 실험에서 질소결핍 진단에 매우 유용한 파장이 녹색 중심파장인 550 nm인 실험결과와 약간의 차가 있는 결과이다. 파장대 690~724 nm와 파장대 1,886~1,990 nm 영역에서 영역내 파장별 최초 진단 가능일로 판단한 가장 민감한 파장대는 각각 700~724 nm(중심파장 : 712 nm)와 1,886~1,894 nm(중심파장 : 1,890 nm) 영역으로 분석되었다.

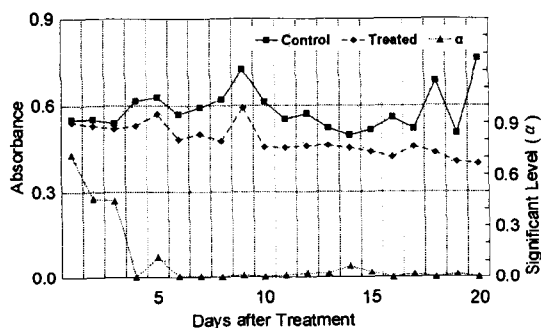
(2) 분광 분석에 의한 질소 결핍 진단

처리구와 대조구 오이의 1차 실험시 전술한 민감 파장대의 중심 파장인 562 nm와 712 nm와 1,890 nm에서 관찰한 흡광도 변화는 그림 4와 같다. 그림과 같이 질소 결핍 오이는 대조구 오이에 비하여 흡광도가 낮은 경향이 분명하며 t 검정 결과 562 nm와 712 nm와 1,890 nm 공히 처리 후 3일 또는 4일째부터 유의수준 5% 미만의 유의차가 인정되었고, 이러한 진단의 정확도는 본 연구에서 사용한 4가지 측정

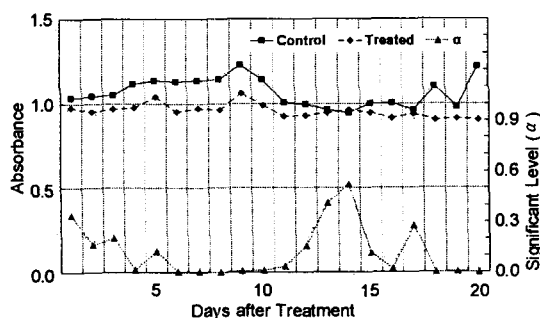
기 중 가장 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 2차 실험과 3차 실험에서도 매우 흡사한 결과였다. 따라서 질소 결핍 장해는 이상의 3가지 파장에서 수



[a] at a wavelength of 562 nm



[b] at a wavelength of 712 nm



[c] at a wavelength of 1,890 nm

Fig. 4 Comparison of the light absorbance of N-deficient(Treated) and controlled (Control) cucumber leaves and the significant level(α) of their difference during the 1st experimental periods.

집한 흡광도 자료에 의해 장해 부과 후 3~4일째부터 그 진단이 가능한 것으로 판단하였다.

4. 적 요

오이를 공시재료로 하여, 생육중인 식물 잎으로부터 비교적 신속하게 생체정보 수집이 가능한 비파괴 측정기인 엽록소 측정기, 엽록소 형광측정기, 적외선 엽록소 측정기, 반사형 분광분석기를 이용하여 질소 결핍장해 오이의 조기 진단 가능성 여부와 그 유용한 정도를 파악하기 위하여 수행한 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

1) 엽록소 측정기의 측정값으로서 질소 결핍장해 오이의 진단은 엽록소 함량 45 SPAD 이하 여부로서 판단할 수 있고, 이에 의한 질소 결핍 장해의 진단은 장해 발생 후 빠르면 3일 정도면 적중율 95% 수준의 장해 진단이 가능하고 7~10일 후에는 높은 정확도의 진단이 가능함을 알 수 있었다.

2) 엽록소 형광 측정에 의한 질소 결핍장해 오이의 진단은 장해 발생 후 빠르면 5일째부터 적중율 95% 수준의 장해 진단이 가능하며, 이에 의한 오이의 질소 결핍장해 진단은 엽록소 함량 측정에 의한 진단보다는 우수하지 못하다. 그리고 대기-엽온차에 의해 질소 결핍장해 오이의 진단은 불가능한 것으로 판단되었다.

3) 분광분석기의 흡광도 분석에 의한 질소 결핍 진단의 민감 파장대는 562~564 nm, 700~724 nm, 1,886~1,894 nm으로 분석되었다. 이러한 영역의 파장에 의한 질소 결핍장해 오이의 진단은 장해 발생 후 3~4일째부터 적중율 95% 수준의 진단이 가능하며, 진단의 정확도는 본 연구에서 사용한 4가지 측정기 중 가장 우수하였다.

참 고 문 헌

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. 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., W. G. Cibula and R. L. Miller. 1996. Narrow-band reflectance imagery compared with thermal imagery for early detection of plant stress. *J. of Plant Physiology* 148(5):515-522.
6. Carter, G. A. and R. L. Miller. 1994. Early detection of plant stress by digital imaging within narrow stress-sensitive wavebands. *Remote Sensing of Environment* 50(3):295-302.
7. Casady, W. W., N. Singh and T. A. Costello. 1996. Machine vision for measurement of rice canopy dimensions. *Trans. of the ASAE*. 39(5):1891-1898.
8. Christopher, D. Elvidge and Zhikang Chen. 1995. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 54:38-48.
9. Cooper, A. J. 1975. Crop production in recirculating nutrient solution. *Scientia Hort.* 3:251-258.
10. Fernandez, S., D. Vidal, E. Simon and L. Sole-Sugranes. 1994. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. *Int. J. Remote Sensing*. 15(9):1867-1884.
11. Filella, L., Serrano, J. Serra and J. Penuelas. 1995. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop Sci.* 35:1400-1405.
12. Giltenson, A. A., M. N. Merzlyak and H. K. Lichtenthaler. 1996. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measure-

- ments near 700 nm. *J. Plant Physiology* 148:501-508.
13. 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.
 14. 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.
 15. Lichtenthaler, H. K. et al. 1998. Plant stress detection by reflectance and fluorescence. *Annals of New York Academy of Sciences*. 455-469.
 16. Merva, G. E. 1995. *Physical Principles of the Plant Biosystem*. ASAE.
 17. Pearcy, R. W. et al. 1989. *Plant Physiological Ecology*. Chapman and Hall Ltd.
 18. Penuelas, J. et al. 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water- limited sunflower leaves. *Remote Sens. Environ.* 48:135-146.
 19. Singh, N., W. W. Casady and T. A. Costello. 1996. Machine-vision-based nitrogen management models for rice. *Trans. of the ASAE*. 39(5):1899-1904.
 20. Stone, M. L. et al. 1996. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. *Trans. of the ASAE*. 39(5):1623-1631.