

스트레스에 따른 작물의 온도 변화 측정

Measurement of Stress Related Crop Temperature Variations

김기영* · 류관희 · 채희연

서울대학교

Kim, G.Y* · Ryu, K.H · Chae, H.Y

Seoul National University

서 론

생물학적 또는 비생물학적 이유에 의해 성장에 나쁜 영향을 받아 식물이 스트레스를 받게 되면 여러 가지 증상이 나타날 수 있다. 예를 들면, 수분 공급이 부족하거나 잎 표면의 수분 함량의 평형이 깨어지면 광합성과 증산이 줄거나, 기공이 닫혀 잎 표면의 온도가 증가한다. 또한 잎이나 식물 균락으로부터 방사되는 에너지의 양이나 질이 변할 수도 있다.

식물의 이러한 반응을 측정·분석하면 식물이 받고 있는 스트레스에 대한 이해를 넓힐 수 있다. 식물의 스트레스 측정은 식물에 또 다른 스트레스를 주지 않도록 비접촉, 비파괴적인 방법으로 이루어 져야 한다. 비접촉, 비파괴 측정 방법의 대표적인 것으로 디지털 영상처리 기법을 들 수 있다. 식물의 생육상태 파악을 위하여 사용되는 디지털 영상처리 기법은 주로 동일한 관찰 대상에 대한 여러 색상의 다중 영상을 서로 비교 분석하는 방법을 사용하고 있다. 이러한 디지털 영상처리 기법에 의해 얻어진 정보는 컴퓨터에 입력·처리되어 분석과 평가가 용이해지기 때문에 작물에 나타난 이상 변화를 관찰할 경우 객관적이고 일관성 있게 식물을 관찰하여 작물 피해 분석의 정확성을 높일 수 있다. 하지만 이런 일반적인 영상처리 장치를 이용할 경우 생리학적인 스트레스에 기인하여 발생하는 식물의 반응은 관찰하는 순간에 그 증상이 심하지 않아 눈에 띄지 않을 수가 있다. 식물의 생육 장애를 보다 빨리 측정할 수 있는 방법의 하나로 열영상을 이용한 식물의 온도 분석 방법이 있다. 열영상 장치는 식물로부터 나오는 적외선을 측정하여 관찰 대상 작물의 온도를 물리적으로 접촉하지 않고도 비파괴적이며 연속적으로 측정할 수 있게 해준다. 이러한 열영상 장치를 이용할 경우 식물의 스트레스에 따른 증상을 보다 빨리 감지할 가능성이 있다.

적외선 영상을 이용하여 작물의 상태를 조사한 연구가 소수의 연구자들에 의하여 수행되었는데, Hashimoto 등(1984)은 열영상장치를 사용하여 수분스트레스를 받은 해바라기 잎의 온도가 수분을 충분히 공급받은 해바라기 잎의 온도보다 3 - 5 °C 정도 더 높은 것을 발견하였다. Ceccardi 등(1995)은 적외선 영상을 이용하여 식물 잎과 짝이 열 때 발생하는 열을 측정하므로써 물 공급이 잘된 식물의 어는 온도가 가뭄을 겪은 식물의 어는 온도보다 높다는 것을 밝힐 수 있었다. 식물 개체의 온도 분석과 함께 작물 균락의 온도에 대한 연구도 이루어 졌다. Inoue (1986)는 적외선 영상장치를 사용하여 작물균락의 온도 분포를 조사하였는데 작물균락의 온도변화가 가우시안 분포를 잘 따르는 것으로 나타났다. Blazquez (1989)는 항공 적외선 사진 분석을 통하여 복숭아 나무 건강정도를 분석하였

는데 전문가의 항공 사진 분석을 통한 건강정도 등급 판정과 매우 유사한 결과를 얻었다.

본 연구에서는 시설원에 작물 재배시 나타날 수 있는 작물의 특정 영양분 결핍 및 과잉 스트레스를 대상으로 하여 작물의 온도 반응을 구명할 목적으로 수행되었다.

재료 및 방법

1. 열영상 장치

열영상 장치는, 물체가 복사하는 에너지의 양은 물체의 절대온도의 네 제곱에 비례한다는, Stefan-Boltzmann의 법칙에 근거하여 물체의 온도를 측정한다. 복사는 물체 표면에서의 온도의 함수이므로 물체의 온도를 이 복사로부터 계산할 수 있다. 절대온도 0 K 이상에 놓여 있는 물체는 모두 그 표면에서 에너지를 방출한다. 이 에너지는 전자기파의 형태로서 빛의 속도로 이동한다. 만약 이 에너지가 에너지를 통과시키지 않는 물체에 부딪히면 그 물체에 의해 흡수되어 열로 변한다. 적외선 대역은 전자기파 스펙트럼의 파장대역 중에서 라디오파와 가시광 대역 사이에 위치한다(약 0.75 μm 에서 1 mm 까지). 이 적외선 파장대역은 근적외선, 중적외선, 원적외선, 극적외선의 네 부분으로 나누어지며 물체의 온도가 변하면 방출되는 에너지의 파장도 변하게 된다.

원거리 적외선 감지 장치는 3-5 μm 또는 8-12 μm 의 두 가지 영역 중 한 영역에서 작동한다. 원거리 적외선 감지 장치가 위의 파장대역에서 작동하는 이유는 이 영역의 파장에서 대기가 적외선 복사를 흡수하지 않고 통과시키기 때문이다. 물체로부터의 복사는 수은 카드뮴 텔루라이드 (HgCdTe)로 만들어진 적외선 감지 센서의 저항을 변화시킨다. 적외선 감지 센서의 저항 변화는 입사되는 적외선 복사의 세기에 비례하는 전압의 변화를 가져온다. 여러 개의 적외선 감지 센서로 이루어진 센서 배열에서의 전압 변화를 디지털화 하여 물체의 열영상이 이루어진다.

열영상 장치에 감지되는 복사는 관심 대상인 물체의 주위에 있는 다른 물체로부터의 복사와 관심 대상 물체가 반사하는 복사도 포함할 수 있다. 따라서 열영상 장치로 측정되는 복사는 물체의 온도에만 관련된 것은 아니다. 열영상 장치를 이용하여 온도를 정확히 측정하기 위해서는 이와 같은 여러 복사원으로 부터의 영향을 고려하여야 한다. 대부분의 열영상 장치는 이런 영향을 자동으로 보정할 수 있는 기능을 갖추고 있으며, 이 기능을 수행하기 위하여 물체의 방사도를 필요로 한다. 방사도는 완전 흑체와 비교하여 물체로부터 얼마만큼의 복사가 되는가를 측정하는 것으로 물체에 따라 다른 값을 갖는데 식물의 잎은 그 값이 0.98 이다. 실험에 사용한 열영상 장치는 서울대학교 공동기기센터(NICEM)에서 보유하고 있는 장비로서 FLIR 사 (Portland, OR, USA)의 IQ 812 모델이다. 이 장치는 8~12 μm 영역의 적외선을 이용하여 -20 $^{\circ}\text{C}$ ~500 $^{\circ}\text{C}$ 범위에 있는 물체의 온도를 0.06 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 분해능으로 측정할 수 있다.

2. 실험 방법

시설 재배시 작물 성장에 큰 영향을 주는 작물 스트레스의 원인과 증상은 여러 가지가 있을 수 있지만, 이 중에서도 특히 영양분 부족 및 과잉으로 인해 나타나는 스트레스에 대한 개별 작물의 반응을 구명하는데 중점을 두었다. 개별 작물의 영양분 스트레스와 그에 대한 반응을 알아보기 위하여 작물에 알맞은 영양분을 공급한 작물의 온도를 대조구로서 측정하였다. 그 다음 특정 영양분만을 부족 또는 과잉으로 공급하여 스트레스를 유발

시킨 뒤 열영상을 획득하여 작물의 온도 변화를 측정하였다. 영양분 스트레스에 대한 반응 구명을 위하여, 스트레스를 받은 작물의 열영상과 영양분을 알맞게 공급받는 기준 작물에서 획득한 열영상으로부터 분석한 온도의 변화를 비교하였다. 실험 작물의 영양분 공급은 야마자키법에 따른 수경재배액을 이용하였고, 열영상 장치를 이용하여 온도 측정시 외부 영향을 줄이기 위하여 온도와 습도 조절이 가능한 생육장치 내에 작물을 위치하여 열영상을 획득하였다.

가로 320 화소, 세로 240 화소로 이루어진 열영상은 작물로부터 약 30cm 떨어진 곳에서 열영상 장치에 의해 획득된다. 열영상은 온도에 따라 각기 다른 256가지 색으로 표현된다. 열영상에서 작물과 배경의 분리를 용이하게 하기 위하여 균일한 온도분포를 유지할 수 있는 스티로폼을 작물의 배경으로 사용하였다. 실험중 대기의 온도는 25 ℃, 상대 습도는 50 %로 유지되었다. 작물의 온도 변화를 일으키기 위해 작물생육장치에 설치된 할로겐등을 이용하여 광에너지를 공급하고 광에너지의 공급이 시작된 순간부터 약 1시간 동안 매 2분 간격으로 열영상을 획득하여 시간에 따른 온도 변화를 분석하였다. 작물 잎 표면의 온도 변화는 열영상 장치와 함께 제공되는 열영상 처리 프로그램을 사용하여 분석하였다. 실험에는 파종한지 3주가 지난 오이 묘를 사용하였으며, 작물 개체간의 특성에 따른 오차를 고려하여 각 작물별로 3개체 씩 온도 변화를 측정하여 그 평균값을 조사하였다. 그림 1에 작물의 온도 측정을 위한 실험장치의 구성도를 나타내었다.

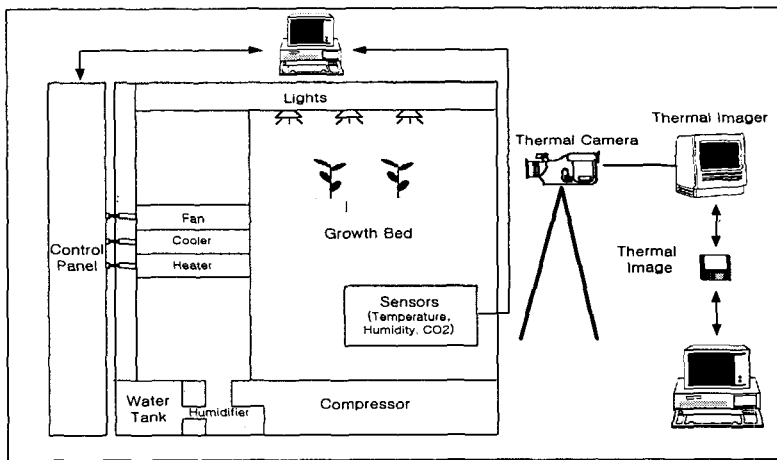


Fig. 1. Schematic diagram of a thermal image processing system

결과 및 고찰

영양분 스트레스에 대한 작물의 반응을 알아보기 위하여 실험 기간 동안 영양소가 적절히 포함된 배양액을 충분히 공급한 작물과 배양액의 공급을 중단한 작물의 온도변화를 살펴보았다. 온도 변화 양상은 질소, 칼륨 성분이 부족 또는 과잉일 때는 영양분을 정상적으로 공급받는 경우보다 낮은 온도를 유지하는 것으로 나타났다. 인산 성분이 부족할 때는 정상일 때와 온도 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. N 부족 및 과잉 스트레스, P 부족 스트레스, K 부족 및 과잉 스트레스에 대한 작물의 온도 반응을 그림 2, 3, 4에 각각 나타내었다. 스트레스를 받은 작물과 스트레스를 받지 않은 작물 모두 전등을 켜 후 서서히

온도가 올라가 실험 시작후 약 10분 경에 정상상태에 도달하였다. 정상적으로 영양분을 공급받은 작물은 시간이 지남에 따라 생육장치의 설정온도인 25 ℃ 로 수렴하였다. N 과 K 가 부족하거나 과잉으로 공급받은 작물은 생육장치 내의 설정온도 보다 2 ℃ 정도 작은 약 23 ℃를 유지하였다.

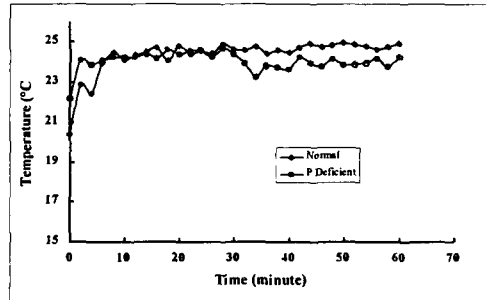
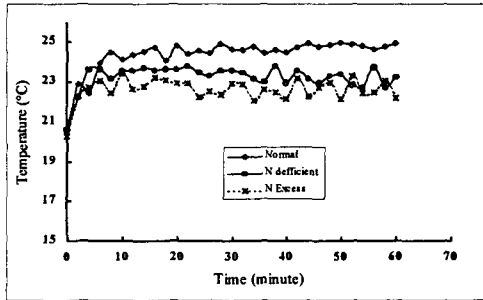


Fig. 2. Effect of nitrogen related stresses on cucumber leaf temperature

Fig. 3. Effect of phosphorus deficiency stress on cucumber leaf temperature

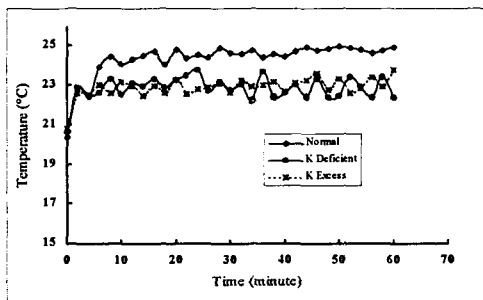


Fig. 4. Effect of potassium related stresses on cucumber leaf temperature

오이 이외의 다른 작물에서도 성장 환경의 부족으로 인하여 스트레스가 발생할 때 이를 온도 변화를 통하여 감지할 수 있을 것으로 예측되며, 이에 대한 연구도 필요한 것으로 판단된다.

인용문헌

1. Blazquez, C.H. 1989. Densitometry, image analysis, and interpretation of aerial color infrared photographs of citrus. Hortscience 24(4):691-693.
2. Ceccardi, T. L., R. L. Heath, and I.P. Ting. 1995. Low-temperature exotherm measurement using infrared thermography. Hortscience 30(1):140-142.
3. Hashimoto, Y., T. Ino, P.J. Kramer, A.W. Naylor, and B.R. Strain. 1984. Dynamic analysis of water stress of sunflower leaves by means of a thermal image processing system. Plant Physiology 76:266-269.
4. Inoue, Y. 1986. Remote-monitoring of function and state of crop community. Japanese Journal of Crop Science 55(2):261-268.