

열화상을 이용한 작물 성장 감시⁺

Plant Growth Monitoring using thermography

채희연, 류관희*, 김기영*
정회원 정회원 정회원
CH.Y Chae, K.H. Ryu, K.Y. Kim

1. 서론

작물의 상태를 바탕으로 하여 온실 안의 환경을 제어해 주기 위해서는 작물의 상태를 작물 성장에 방해가 되지 않는 방법으로 빠르게 측정하여야 하는데, 현재까지 개발된 작물 상태 측정법들은 작물에 영구적인 손상을 줄 뿐 만 아니라 시간과 인적 자원을 많이 요구하고 있다. 뿐만 아니라 눈에 띄는 작물의 변화를 이용하여 작물의 상태를 파악할 경우 작물의 이상을 발견하고 이에 대처하기에는 너무 늦은 경우가 많다.

식물의 생육 장애를 보다 빨리 측정할 수 있는 방법의 하나로 열화상을 이용한 식물의 온도 분석 방법이 있다. 원격측정의 한 방법인 열화상과 디지털 영상분석은 식물로부터 나오는 적외선을 측정하여 관찰 대상 작물을 물리적으로 접촉하지 않고도 비파괴적이며 연속적으로 정보를 얻고 해석하게 해준다. 원격측정에 의해 얻어진 정보는 컴퓨터에 입력·처리되어 분석과 평가가 용이해지기 때문에 사람이 작물에 나타난 이상 변화를 보고 스트레스의 원인을 분류할 때 생길 수 있는 관찰자의 주관성에 기인한 오류를 줄일 수 있다. 이러한 열영상 장치를 이용할 경우 식물의 스트레스에 따른 증상을 보다 빨리 감지할 가능성이 있다.

열화상을 이용하여 작물의 상태를 조사한 연구가 소수의 연구자들에 의하여 수행되었다. Ceccardi 등(1995)은 열화상을 이용하여 식물 잎과 싹이 열 때 발생하는 열을 측정함으로써 물 공급이 잘된 식물의 어는 온도가 가뭄을 겪은 식물의 어는 온도보다 높다는 것을 밝힐 수 있었다. Inoue (1986)는 열화상 장치를 사용하여 작물군락의 온도 분포를 조사하였는데 작물군락의 온도변화 범위는 3℃ 이하인 것으로 나타났다. Hashimoto 등(1984)은 열화상 장치를 사용하여 수분 스트레스를 받은 해바라기 잎의 온도가 수분을 충분히 공급받은 해바라기 잎의 온도보다 3 ~ 5℃ 정도 더 높은 것을 발견하였다. Blazquez (1989)는 항공 적외선 사진 분석을 통하여 복숭아 나무 건강정도를 분석하였는데 전문가의 항공 사진 분석을 통한 건강 정도 등급 판정과 매우 유사한 결과를 얻었다.

본 연구의 목적은 시설재배의 부적합한 성장환경에서 유발되는 스트레스에 의한 작물의 상태 변화를 감지할 수 있는 작물 감시 시스템의 개발 가능성을 구명하기 위한 것이다.

+ 이 논문은 1998년 과학재단 연구비에 의하여 연구되었음

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

2. 재료 및 방법

시설 재배시 작물 성장에 큰 영향을 주는 작물 스트레스의 원인과 그에 따라 작물에 나타나는 증상은 매우 다양하기 때문에 그들의 상관관계를 한 번에 모두 파악한다는 것은 어려운 일이다. 따라서 이 연구에서는 칼륨, 인, 질소 영양분 부족 및 과잉으로 인해 나타나는 스트레스에 대한 작물의 온도 반응을 구명하는데 중점을 두었다.

작물의 영양분 스트레스와 그에 대한 온도 반응을 알아보기 위하여 작물에 알맞은 수분과 영양분을 공급한 작물의 온도를 대조구로서 측정하였다. 그 다음 작물에 스트레스를 유발시킨 뒤 열화상을 획득하여 작물의 온도 변화를 측정하였다. 스트레스에 대한 반응 구명을 위하여, 스트레스를 받은 작물의 열화상과 수분 및 영양분을 알맞게 공급받는 대조구에서 획득한 열화상으로부터 분석한 온도의 변화를 비교하였다.

열화상 장치를 이용하여 온도 측정할 때 외부 영향을 줄이기 위하여 온도와 습도 조절이 가능한 생육장치 내에 작물을 위치하여 열화상을 획득하였다. 열화상은 작물로부터 약 30cm 떨어진 곳에서 열화상 촬영기에 의해 획득하였다. 촬영된 열화상에서 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 할로젠등을 이용하여 광에너지를 공급하고 광에너지의 공급이 시작된 순간부터 약 1시간 동안 매 2분 간격으로 열화상을 획득하여 시간에 따른 온도 변화를 분석하였다. 그림 1에 작물의 온도 측정을 위한 실험장치의 구성도를 나타내었다.

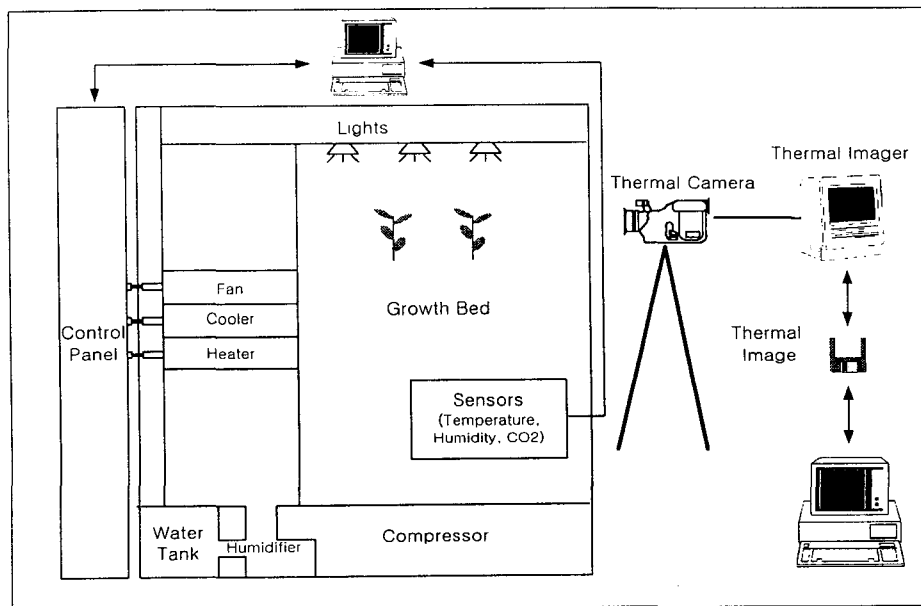


Fig. 1 Schematic diagram of the thermal image processing system

실험 대상 작물로 국내 시설 작물 재배 면적을 조사하여 재배 면적이 넓은 오이, 고추, 상추 등 3 가지 작물을 선정하였다. 오이와 상추는 파종 후 3주가 지난 모종을 사용하였으며, 제 2 분엽을 대상으로 열화상을 분석하였다. 고추는 파종 후 7주가 지난 모종을 사용하였다.

획득된 열화상은 열화상 처리 프로그램을 사용하여 분석하였다. 획득된 열화상은 가로 320 화소, 세로 240 화소로 이루어져 있으며, 온도에 따라 각기 다른 256색으로 표현된다. 각각의 작물의 열화상에서 잎의 온도만을 평균하여 그 변화를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 질소 스트레스에 대한 작물의 온도 반응 분석

그림 2는 질소 스트레스에 대한 오이의 온도 반응을 나타낸 것이다. 스트레스를 받은 작물과 스트레스를 받지 않은 작물 모두 전등을 켜 후 서서히 온도가 올라가 실험 시작 후 약 10분 경에 정상상태에 도달하였다. 정상적으로 영양분을 공급받은 작물은 시간이 지남에 따라 생육 장치의 설정온도인 25℃로 수렴하였다. 그러나, 질소 성분이 과잉 또는 결핍된 양액을 공급받은 작물은 설정온도에 수렴하지 못하고, 생육장치의 설정 온도보다 약 2℃ 정도 낮은 23℃ 근방에서 약 1℃의 진폭으로 온도가 변화하였다.

그림 3은 질소 스트레스에 대한 상추의 온도 반응을 나타낸 것이다. 분석 결과 질소의 결핍 또는 과잉 스트레스에 대해서 실험 시작 35분까지는 그다지 큰 반응을 나타내지 않는 것으로 나타났다. 전등을 켜고 실험을 시작한 후 약 35분부터 스트레스를 받은 작물의 온도가 조금씩 낮아지기 시작하였는데, 질소가 결핍된 영양분을 공급받은 작물은 약 45분이 지나면서 다시 정상적으로 영양분을 공급받은 작물의 온도와 비슷해졌다. 질소가 과잉된 양액을 공급받은 작물은 온도가 서서히 낮아져 실험이 끝날 무렵엔 정상적으로 영양분을 공급받은 작물의 온도보다 약 2℃ 정도 낮은 약 23℃를 유지하였다. 정상적으로 영양분을 공급받은 작물은 실험이 끝날 때까지 온도가 거의 변화하지 않고 약 25℃를 유지하였다.

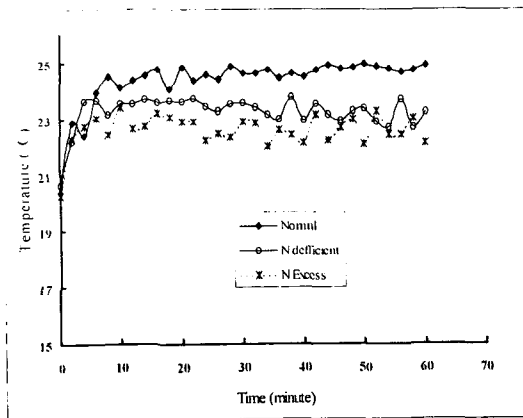


Fig. 2 Effects of nitrogen stress on leaf temperature of cucumber

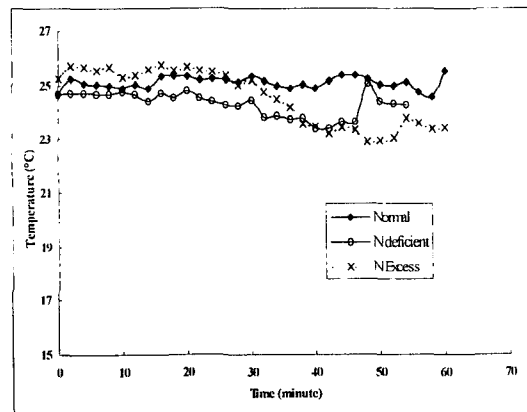


Fig. 3 Effects of nitrogen stress on leaf temperature of lettuce

그림 4는 질소 스트레스에 대한 고추의 온도 반응을 나타낸 것이다. 질소 결핍 스트레스를 받은 작물은 실험 시작 전 양액을 충분히 공급받은 고추 잎과의 온도차를 실험 시작 후 약 30분까지 유지하다가 30분이 지나면서 정상적으로 양액을 공급한 작물과 온도가 같아졌다. 질소가 과잉으로 공급된 양액을 공급받은 작물은 실험을 시작한 후 급격히 온도가 떨어져 실험 시작 약 5분 경에는 스트레스를 받지 않은 작물보다 약 3°C 정도 낮은 온도를 나타내었다. 약 20분이 지나면서 온도가 다시 상승하여 시작 20분 경부터 스트레스를 받지 않은 작물보다 2°C 정도 낮은 온도를 유지하였다.

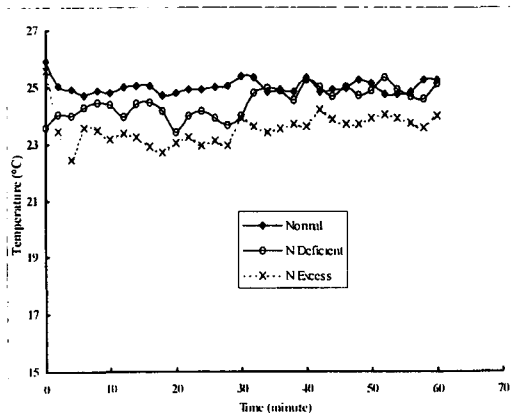


Fig. 4 Effects of nitrogen stress on leaf temperature of hot pepper

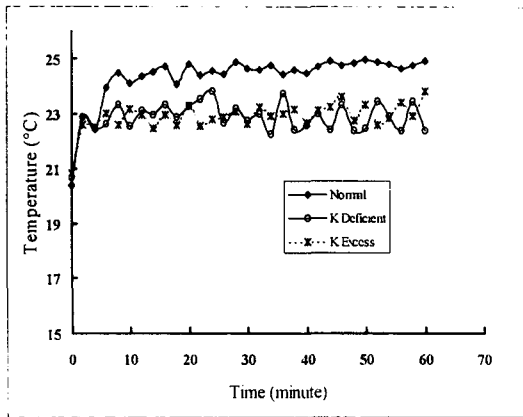


Fig. 5 Effects of potassium stress on leaf temperature of cucumber

나. 칼륨 스트레스에 대한 작물의 온도 반응 분석

그림 5는 칼륨의 과잉 및 결핍에 의한 스트레스에 대한 오이의 온도 반응을 나타낸 것이다. 칼륨 스트레스에 대한 반응은 질소 스트레스에 대한 반응과 비슷하게 나타났다. 스트레스를 받은 작물과 스트레스를 받지 않은 작물 모두 전등을 켜 후 서서히 온도가 올라가 실험 시작 후 약 10분 경에 정상상태에 도달하였다. 시간이 지남에 따라 정상적으로 영양분을 공급받은 작물은 25°C로 수렴하였고, 칼륨 스트레스를 받은 작물은 질소 스트레스를 받은 작물과 마찬가지로 설정온도에 수렴하지 못하고, 정상상태 오이 잎의 온도보다 약 2°C 정도 낮은 23°C를 유지하였다.

그림 6은 칼륨의 과잉 및 결핍에 의한 스트레스에 대한 상추의 온도 반응을 나타낸 것이다. 칼륨 결핍 스트레스에 대한 상추의 온도 반응은 정상 상태의 상추 잎의 온도와 비교하여 차이가 없는 것으로 나타났다. 칼륨 결핍 스트레스를 받은 작물과 스트레스를 받지 않은 작물은 모두 실험을 시작한 후부터 실험이 끝날 때까지 작물생육장치의 설정 온도인 25°C를 유지하였다. 그에 반해 칼륨 과잉 스트레스에 대해서 상추는 정상 상태의 상추에 비하여 낮은 온도를 갖는 것으로 나타났다. 실험을 시작한 후 조금씩 계속 온도가 낮아져서 60분 경에는 정상적으로 영양분을 공급받은 작물의 온도보다 약 2°C 정도 낮은 온도를 유지하였다.

그림 7은 칼륨이 과잉 또는 부족하게 양액이 공급되었을 때의 고추의 온도 반응을 나타낸 것이다. 칼륨이 과잉으로 공급된 작물과 부족하게 공급된 작물은 서로 유사한 온도 반응을 보였다. 칼륨 스트레스를 받은 작물의 온도는 처음 30분 동안은 스트레스를 받지 않은 작물과 큰 온도차이를 보이지 않았다. 스트레스를 받은 고추 잎의 온도는 30분이 지나면서 온도가 서서히 낮아지기 시작하여 50분 경부터는 약 23℃로 떨어져 스트레스를 받지 않은 작물과 약 2℃의 온도 차이를 보였다.

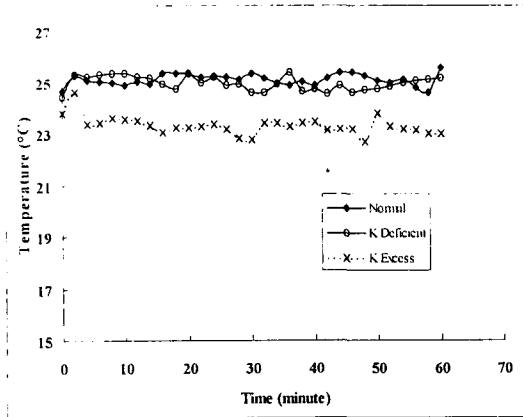


Fig. 6 Effects of potassium stress on leaf temperature of lettuce

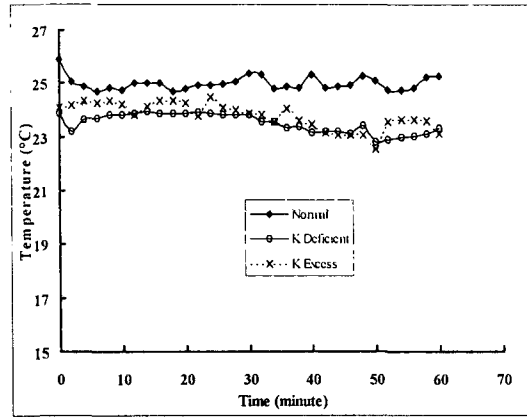


Fig. 7 Effects of potassium stress on leaf temperature of hot pepper

다. 인 스트레스에 대한 작물의 온도 반응 분석

인의 결핍에 의해 스트레스를 받은 오이의 온도 반응은 그림 8에서 보는 바와 같이, 질소와 칼륨 스트레스를 받았을 때와는 다른 양상을 나타내었다. 스트레스를 받은 작물과 스트레스를 받지 않은 작물 모두 전등을 켜 후 서서히 온도가 올라가 실험 시작 후 약 30분 쯤까지 거의 비슷한 온도를 유지하였다. 정상적으로 영양분을 공급받은 작물은 계속해서 생육장치의 설정 온도인 25℃로 수렴하였다. 그러나, 인 성분이 결핍된 양액을 공급받은 작물은 실험 시작 후 30분이 지나면서부터 온도가 조금 내려가 생육장치의 설정 온도보다 약 1℃ 정도 낮은 24℃를 유지하였다.

그림 9는 상추의 인 스트레스에 대한 온도 반응을 나타낸 것이다. 인 결핍에 의한 스트레스에 대해서도 칼륨 결핍 스트레스에 대한 실험에서와 마찬가지로 상추는 별다른 반응을 나타내지 않았다. 인 결핍 스트레스를 받은 상추 잎의 온도는 실험을 시작한 후부터 실험이 끝날 때까지 스트레스를 받지 않은 상추 잎의 온도와 차이가 없었다.

그림 10은 인 결핍 스트레스에 대한 고추의 온도 반응을 나타낸 것이다. 고추는 오이와 상추 보다는 인 결핍에 의한 스트레스에 대해서 더 민감한 반응을 보였다. 인 결핍 스트레스를 받은 고추 잎의 온도도 칼륨과 질소 결핍 스트레스를 받은 고추 잎의 온도와 마찬가지로 스트레스를 받지 않았을 때보다 낮은 온도를 유지하였다. 고추는 인이 결핍된 양분을 공급받았을 때 실

험 시작 후부터 서서히 온도가 낮아지기 시작하여 실험 시작 후 40분 경에는 스트레스를 받지 않았을 때보다 약 2.5°C 낮은 온도를 나타내었다. 그 이후로 다시 서서히 온도가 상승하여 실험 종료 시 인 결핍 스트레스를 받은 작물의 온도는 스트레스를 받지 않은 작물의 온도보다 약 1.5°C 낮은 상태가 되었다.

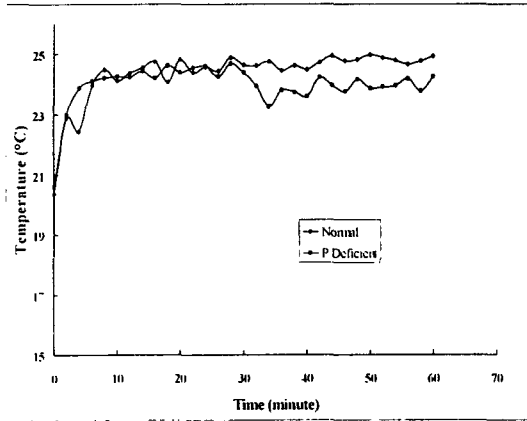


Fig. 8 Effects of phosphorus stress on leaf temperature of cucumber

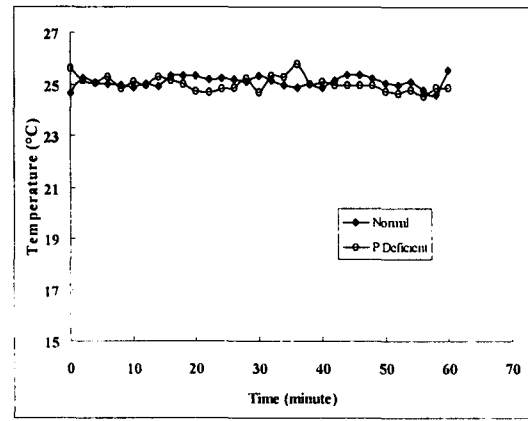


Fig. 9 Effects of phosphorus stress on leaf temperature of lettuce

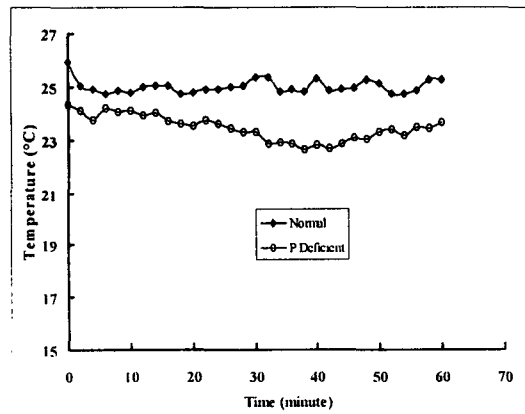


Fig. 10 Effects of phosphorus stress on leaf temperature of hot pepper

4. 요약 및 결론

본 연구는 시설재배시 부적합한 성장환경에서 유발되는 작물의 스트레스에 의한 작물의 상태 변화를 감지할 수 있는 작물 감시 시스템의 개발 가능성을 구명하기 위해 영양분 스트레스에 대한 오이, 상추, 고추 등의 세 가지 작물에 대한 온도 반응을 열화상 분석 장치를 사용하여 조사하였으며, 연구 결과 열화상 장치를 이용하면 작물의 상태변화를 보다 빨리 감지할 수 있는 작물 감시 시스템을 개발할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 작물 및 스트레스의 종류에 따라 서로 반응을 보이므로, 보다 정확한 감시 시스템을 개발하기 위해서는 양액의 영양분 분

석이 추가되어야 할 것으로 판단된다.

5. 참고 문헌

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.