

열영상 정보를 이용한 온실 재배 작물의 수분 스트레스 분석[†]

Analysis of Water Stress of Greenhouse Crops Using Infrared Thermography

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

ABSTRACT

Automated greenhouse production systems often require crop growth monitoring involving accurate quantification of plant physiological properties. Conventional methods are usually burdensome, inaccurate, and harmful to crops. A thermal image analysis system can accomplish rapid and accurate measurements of physiological-property changes of stressed crops. In this research a thermal imaging system was used to measure the leaf-temperature changes of several crops according to water deficit. Thermal images were obtained from lettuce, cucumber, pepper, and chinese cabbage plants. Results showed that there were significant differences in the temperature of stressed plants and non-stressed plants. The temperature differences between these two group of plants were 0.7 to 3°C according to species.

주요용어(Key Words): 영상처리(Image processing), 열영상(Thermal image), 작물 성장(Crop growth), 작물 성장 감시(Crop growth monitoring), 비파괴 측정(Non-destructive measurement)

1. 서 론

식물은 생물학적 또는 비생물학적 이유에 의해 성장에 나쁜 영향을 받으면 스트레스를 받게 된다. 스트레스나 질병에 의한 증상은 여러가지로 나타날 수 있다. 물 공급이 잘 안되거나 표피의 수분 함량의 평형이 잘 안맞으면 기공이 닫히고, 광합성과 증산이 줄게 되어 잎표면의 온도가 증가한다. 또한 식물의 병든 상태는 잎이나 식물 군락으로부터 방사되는 에너지의 양이나 질에 영향을 미친다.

건강한 작물의 잎은 파장 390~770 nm 영역의 가

시광선을 조금 반사하고 750~1,100 nm 영역의 근적외선을 많이 반사한다. 가시광선 영역의 빛이 조금 밖에 반사되지 않는 것은 엽록소와 같은 식물이 가지고 있는 염료에 의해 빛이 흡수되기 때문이다. 물리적으로 스트레스를 받거나 병이 들거나, 영양이 결핍되었거나, 광합성 염료가 줄게 되면 적색과 청색의 반사율이 높고 근적외선의 반사량이 현저히 줄어든다.

원격측정의 한 방법인 열영상과 디지털 영상 분석은 관찰 대상 작물을 물리적으로 접촉하지 않고도 비파괴적이며 연속적으로 정보를 얻고 분석하게 해

[†] 한국과학재단의 연구 지원에 의하여 수행된 연구임

* 서울대학교 생물자원공학부 농업기계전공

준다. 열영상 장치 및 디지털 영상처리 장치에 의해 얻어진 정보는 컴퓨터에 입력·처리되어 분석과 평가가 용이해지기 때문에 작물에 나타난 이상 변화를 관찰할 경우 객관적이고 일관성있게 식물을 관찰하여 작물 피해 분석의 정확성을 높일 수 있다. 또한 생리학적인 스트레스에 기인하여 발생하는 식물의 반응은 관찰하는 순간에 그 증상이 심하지 않아 눈에 띄지 않을 수가 있지만 열영상 장치를 이용할 경우 그 증상을 보다 빨리 감지할 수 있다.

영상처리에 의해 작물의 성장이나 상태를 모니터링하는 연구가 Hatou 등(1995), Iwao와 Shibata(1992), 그리고 Shimizu와 Heins (1995) 등에 의하여 수행되었다.

Hatou 등(1995)은 양액재배시 토마토의 병해를 판별하는 방법을 영상처리와 전문가 시스템을 결합하여 개발하였는데 이 장치를 이용하여 토마토 재배시 발생하는 병해를 판별할 수 있었다. 식물 성장 감시 장치의 개념적인 구성을 Iwao와 Shibata(1992)가 제시하였는데 이 논문에서는 장치의 실제 운용이나 작물을 대상으로 한 검증실험 없이 영상처리장치의 구성과 영상신호의 흐름에 대한 간략한 원리만을 기술하였다. Shimizu와 Heins (1995)는 CCD 카메라와 적외선 조명 장치를 이용하여 어둠 속에서 식물의 영상을 얻고 분석하는 방법으로 작물의 성장을 0.025 mm까지 측정할 수 있었다. Spomer와 Smith (1989) 등은 영상처리장치를 이용하여 식물 잎의 형상 변화를 분석함으로써 작물의 수분 스트레스와 잎 형상 변화와의 관계를 구명하였다.

적외선 영상을 이용하여 작물의 상태를 조사한 연구가 소수의 연구자들에 의하여 수행되었는데, Ceccardi 등(1995)은 적외선 영상을 이용하여 식물 잎과 짝이 열 때 발생하는 열을 측정하므로써 물 공급이 잘된 식물의 이는 온도가 가뭄을 겪은 식물의 이는 온도보다 높다는 것을 밝힐 수 있었다. Inoue (1986)는 적외선 영상장치를 사용하여 작물군락의 온도 분포를 조사하였는데 작물군락의 온도변화 범위는 3°C 이하인 것으로 나타났다. Hashimoto 등 (1984)은 열영상 장치를 사용하여 수분 스트레스를 받은 해바라기 잎의 온도가 수분을 충분히 공급받은 해바라기 잎의 온도보다 3~5°C 정도 더 높은 것을 발견하였다. Blazquez (1989)는 항공 적외선 사진 분

석을 통하여 복숭아 나무 건강정도를 분석하였는데 전문가의 항공사진 분석을 통한 건강정도 등급 판정과 매우 유사한 결과를 얻었다.

국외의 경우 열영상을 이용하여 작물에 나타나는 온도의 변화와 스트레스 사이의 관계를 구명하려는 연구가 몇몇 연구자에 진행되었으나, 아직까지 구체적인 작물 스트레스와 그에 따른 작물의 상태를 모니터링하는 연구는 찾아보기 힘든 형편이다.

본 연구에서는 시설원에 작물 재배시 가장 나타나기 쉽고 처리가 용이하면서도 시간을 다투어 빨리 대처해 주어야 하는 수분 스트레스를 대상으로 하여 작물의 온도 반응을 구명하여, 작물의 이상 온도 분포를 유발한 스트레스의 원인을 판별·제거해 줄 수 있는 환경 조절 장치의 개발을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

가. 열영상 장치

(1) 전자기 스펙트럼

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 mm까지). 이 적외선 파장대역은 근적외선, 중적외선, 원적외선, 극적외선의 네 부분으로 나누어지며 물체의 온도가 변하면 방출되는 에너지의 파장도 변하게 된다.

일부 광학 장치는 근적외선 영역에서 작동하지만, 원거리 온도 측정 장치는 중적외선과 원적외선에서 온도를 잴다. 극히 일부 장치만이 극적외선 대에서 작동한다.

원거리 적외선 감지 장치는 3~5 μm 또는 8~12 μm 의 두 가지 영역 중 한 영역에서 작동한다. 원거리 적외선 감지장치가 위의 파장대역에서 작동하는 이유는 이 영역의 파장에서 대기가 적외선 복사를 흡수하지 않고 통과시키기 때문이다.

(2) 방사도

열영상 장치는, 물체가 복사하는 에너지의 양은 물체의 절대온도의 네 제곱에 비례한다는, Stefan-Boltzmann의 법칙에 근거하여 물체의 온도를 측정한다. 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 복사 원인으로 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.

(3) 열영상 장치의 측정원리

열영상 장치는 물체로부터 방출되는 적외선 복사를 측정한다. 복사는 물체 표면에서의 온도의 함수이므로 물체의 온도를 이 복사로부터 계산할 수 있다. 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. 표 1에 실험에 사용된 열영상 장치의 주요 제원을 나타내었다.

Table 1 Thermal Imager Specifications

Temperature Measurement Range	-50~2,000℃
Temperature Resolution	0.08℃ (at 30℃)
Measurement Accuracy	0.5% range full scale
Spectral Response	8 to 13 μm
Frame Time	0.8 seconds

나. 실험 방법

시설재배시 작물 성장에 큰 영향을 주는 작물 스트레스의 원인과 증상은 여러 가지가 있을 수 있지만, 이 중에서도 특히 수분의 부족으로 인해 나타나는 스트레스에 대한 개별 작물의 반응을 구명하는데 중점을 두었다. 개별 작물의 수분 스트레스와 그에 대한 반응을 알아보기 위하여 작물에 다른 조건들은 충분하게 공급하면서 수분 스트레스를 유발시킨 뒤 열영상을 획득하여 작물의 온도 변화를 분석하였다. 수분 스트레스에 대한 반응 구명을 위하여, 스트레스를 받은 작물의 열영상과 수분을 충분하게 공급받은 기존 작물에서 획득한 열영상으로부터 분석한 온도의 변화를 비교하였다. 구체적인 실험방법은 다음과 같다.

수분 스트레스에 대한 작물의 온도 반응 및 분포를 연속적으로 측정하기 위하여 0.08℃의 온도 변화 측정이 가능한 Thermal Imaging Camera(TH3102MR, NEC, Japan)를 작물로부터 50cm 떨어진 곳에 위치시킨 후 열영상을 획득하였다. 열영상은 가로 256 화소, 세로 240 화소로 이루어지며 온도에 따라 256 가지 각기 다른 색으로 표현된다. 열영상에서 작물과 배경의 분리를 용이하게 하기 위하여 균일한 온도분포를 유지할 수 있는 스티로폼을 작물의 배경으로 사용하였다. 또한, 실험 대상 작물에 미치는 외부의 영향을 줄이기 위하여 열영상 측정 장치와 조명이 있는 방향만을 남겨 놓고 스티로폼으로 대상 작물을 격리 시켰다. 실험중 대기의 온도는 24~26℃, 상대 습도는 60%로 유지되었다. 작물의 온도 변화를 일으키기 위해 삼파장등을 이용하여 광에너지를 공급하고 광에너지의 공급이 시작된 순간부터 약 1 시간 동안 매 2분 간격으로 열영상을 획득하여 시간에 따른 온도 변화를 분석하였다. 작물 잎 표면의 온도 변화는 열영상 장치와 함께 제공되는 열영상처리 프로그램을 사용하여 분석하였다. 실험에는 파종 후 4주가 지난 상추, 배추, 오이, 고추묘를 사용하였으며, 작물 개체간의 특성에 따른 오차를 고려하여 각 작물별로 3개체 씩 온도 변화를 측정하여 그 평균값을 조사하였다. 그림 1에 실험장치의 구성도를 나타내었다.

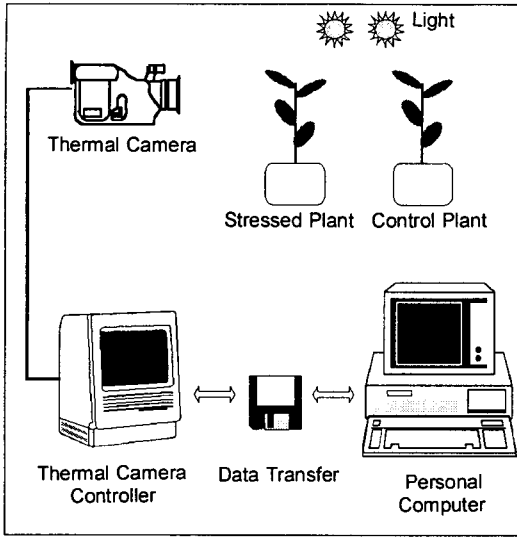


Fig. 1 Schematics of thermal imaging system.

3. 결과 및 고찰

수분 스트레스에 대한 작물의 반응을 알아보기 위하여 실험기간 동안 영양소가 적절히 포함된 배양액을 충분히 공급한 작물과 배양액의 공급을 중단한 작물의 온도변화를 살펴보았다. 온도 변화 양상은 작물에 따라 다른 것으로 나타났다. 상추, 배추, 오이의 경우 실험기간 동안 수분 스트레스를 받은 작물의 온도가 스트레스를 받지 않은 작물의 온도보다 높은 것으로 나타났으나, 고추의 경우 실험을 시작하고 상당기간이 지나서야 스트레스를 받은 작물의 온도가 높아지는 것으로 나타났다. 각 작물별 수분 스트레스에 대한 온도변화는 다음과 같다.

가. 상추

상추는 제 1 본엽을 대상으로 광원을 켜 후 시간에 따른 온도 변화를 조사하였다. 스트레스를 받은 작물과 스트레스를 받지 않은 작물 모두 광에너지의 영향으로 서서히 온도가 상승하기 시작하다가 그림 2에서 보는 바와 같이 실험시작 25분 경에 온도가 가장 높아져 처음 온도보다 약 0.8℃ 높은 상태로 되었다. 실험시작 25분부터 온도가 서서히 하강하여 실험시작 50분 경에 초기온도로 되돌아 왔으며, 스

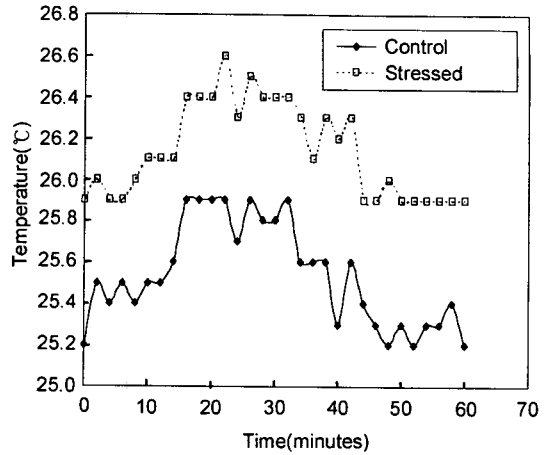


Fig. 2 Leaf-temperature changes of lettuce plants.

트레스를 받은 작물의 온도가 실험기간 동안 스트레스를 받지 않은 작물의 온도보다 0.6~1.0℃ 높게 유지되는 것으로 나타났다.

나. 배추

배추는 제 3 본엽을 대상으로 온도 변화를 조사하였다. 스트레스를 받은 작물은 전등을 켜 후 4분만에 온도가 0.8℃ 가량 상승하였다가 10분이 지나면서 서서히 감소하기 시작하였으며, 실험 시작 20분 후부터는 초기온도에서 ±0.2℃의 차이만을 보였다. 스트레스를 받지 않은 작물의 온도는 전등을 켜 후 4분만에 온도가 0.3℃ 가량 상승하였다가 10분이 지나면서 서서히 감소하기 시작하였으며, 계속해서 온도가 내려가 45분 경부터 초기온도보다 0.8℃ 낮은 상태로 유지되었다. 이 때 스트레스를 받은 작물과 스트레스를 받지 않은 작물의 온도차가 약 1.2℃ 정도 나는 것으로 나타났다 (그림 3).

다. 오이

제 3 본엽을 대상으로 온도 변화를 조사한 오이는, 스트레스를 받은 작물과 스트레스를 받지 않은 작물 모두 전등을 켜 후 큰 온도 변화 없이 초기온도에서 ±0.2℃의 범위 내에서 변화하였다. 광에너지

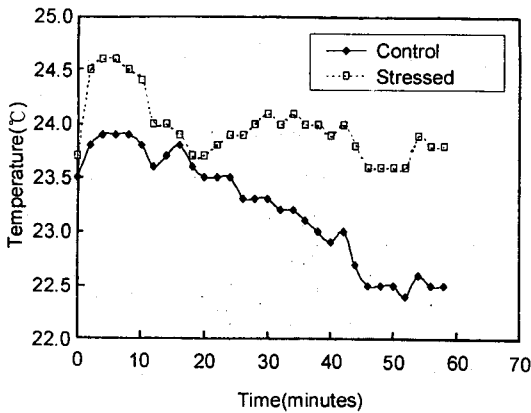


Fig. 3 Leaf-temperature changes of chinese cabbages.

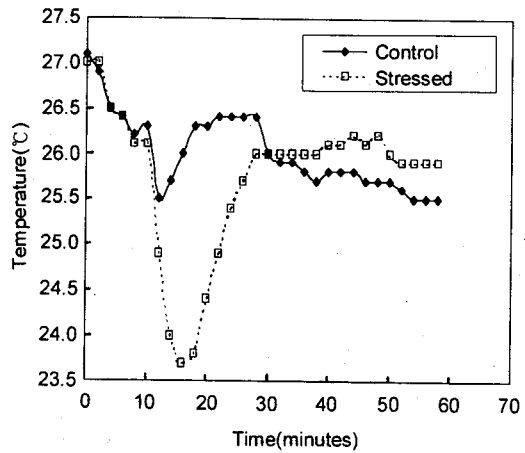


Fig. 5 Leaf-temperature changes of pepper plants.

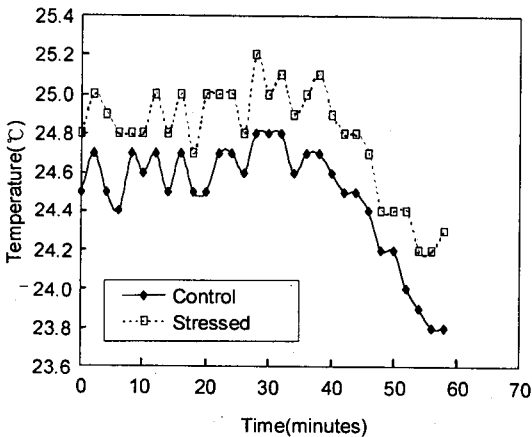


Fig. 4 Leaf-temperature changes of cucumber plants.

를 공급한 후 40분이 지나면서 두 작물 모두 온도가 서서히 내려가 56분 경부터 처음 온도보다 약 0.7°C 낮은 상태를 유지하였다. 그림 4에 수분 스트레스에 따른 온도 변화를 나타내었다.

라. 고추

고추는 다른 작물과 달리 광에너지를 공급받으면서 오히려 온도가 내려가서 일정시간이 지난 후에야 다시 온도가 상승하여 초기 온도보다 약 1~1.5°C 낮은 상태에서 안정되었다. 스트레스를 받은 작물의

온도 하강 폭이 훨씬 두드러져 16분 경에 초기 온도보다 3°C 낮아졌다가 서서히 증가하였다. 스트레스를 받지 않은 작물의 온도 하강 폭은 그보다 작아서 12분 경에 초기 온도보다 1.5°C 낮아졌다가 서서히 증가한 뒤 30분 이후부터 초기 온도보다 약 1.6°C 낮은 상태를 유지하였다 (그림 5).

4. 결 론

수분 스트레스에 따른 작물의 온도변화를 구명하기 위하여 수행된 본 연구를 통하여 다음과 같은 사항을 관찰할 수 있었다. 작물의 종류에 따라 그 크기는 다르지만 일반적으로, 수분 스트레스를 받았을 때 작물의 온도는 수분 스트레스를 받지 않았을 때보다 높게 유지되는 것으로 관찰되었다. 상추, 배추, 오이의 경우 광에너지를 공급하였을 때 온도가 일시적으로 상승하였다가 점차 내려갔으며, 각 작물에 따라 최고 온도와 그 온도에 도달하는 시간에 차이가 있었다. 다른 작물들과 달리 고추는 광에너지를 공급받았을 때 오히려 온도가 크게 내려갔다가 다시 상승하는 것으로 나타났다. 상추, 배추, 고추와 같은 작물은 수분 스트레스를 받은 개체와 스트레스를 받지 않은 개체의 온도 차이가 커, 온도 변화를 이용하여 수분 스트레스의 예측이 가능한 것으로 판단된다. 수분 스트레스 뿐만 아니라, 다른 생장 환경의

부족으로 인한 작물의 스트레스도 작물 온도 변화를 통하여 감지할 수 있을 것으로 예측되며, 이에 대한 연구도 필요한 것으로 판단된다. 또한 시설 재배시 실용적이며 효율적인 작물 상태 모니터링을 위하여는 작물 군락의 스트레스에 대한 반응 구명이 보다 중요하므로, 작물 군락이 스트레스에 어떤 반응을 보이는지를 열영상 분석을 통하여 구명할 필요가 있는 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

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. Hatou, K., H. Nonami, T. Fukuyama and Y. Hashimoto. 1995. Physiological diagnosis of tomato plants grown in hydroponic culture by using image analysis. *Acta Horticulturae* 399:225-232.
5. Inoue, Y. 1986. Remote-monitoring of function and state of crop community. *Japanese Journal of Crop Science* 55(2):261-268.
6. Iwao, K. and T. Shibata. 1992. Development of an automatic plant growth monitoring system based on a personal computer. *Acta Horticulturae* 319:613-616.
7. Shimizu, H. and R. D. Heins. 1995. Computer-vision-based system for plant growth analysis. *Transactions of the ASAE* 38(3):959-964.
8. Shimizu, H. and M. Yamazaki. 1992. Non-contact growth analysis using computer vision system. *Acta Horticulturae* 319:641-646.
9. Spomer, L. A. and M. A. L. Smith. 1989. Image analysis morphometric measurement for tissue water status and other determinations. *Agronomy Journal* 81:906-910.