

## 열영상을 이용한 작물 성장 감시<sup>†</sup> - 영양분 스트레스 분석 -

### Plant Growth Monitoring Using Thermography - Analysis of nutrient stress -

류 관 희*	김 기 영*	채 희 연*
정회원	정회원	정회원
K. H. Ryu	G. Y. Kim	H. Y. Chae

#### SUMMARY

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 nutrient stresses. Thermal images were obtained from lettuce, cucumber, and pepper plants. Plants were placed in growth chamber to provide relatively constant growth environment. Results showed that there were significant differences in the temperature of stressed plants and non-stressed plants.

In a case of the both N deficiency and excess, the leaf temperatures of cucumber were 2°C lower than controlled temperature. The leaf temperature of cucumber was 2°C lower than controlled temperature only when it was under N excess stress. For the potassium deficiency or excess stress, the leaf temperatures of cucumber and hot pepper were 2°C lower than controls, respectively. The phosphorous deficiency stress dropped the leaf temperatures of cucumber and hot pepper 2°C and 1.5°C below than controls. However, the leaf temperature of lettuce did not change.

It was possible to detect the changes in leaf temperature by infrared thermography when subjected to nutrition stress. Since the changes in leaf temperatures were different each other for plants and kinds of stresses, however, it is necessary to add a nutrient measurement system to a plant-growth monitoring system using thermography.

**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

작물의 상태를 바탕으로 온실 내 환경을 제어하

기 위해서는 작물의 상태를 작물 성장에 방해가 되지 않는 방법으로 빠르게 측정하여야 하는데, 현재까지 개발된 작물 상태 측정법들은 작물에 영

<sup>†</sup> This article was submitted for review in May 2000 and accepted for publication in July 2000. Corresponding author is Kwan Hee Ryu, Professor, Major of Agricultural Machinery, School of Bioresources and Materials Engineering, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea. E-mail: <ryukh@snu.ac.kr>

\* Major of Agricultural Machinery, Biological Resources and Materials Engineering, Seoul National University.

구적인 손상을 줄 뿐 아니라 시간과 인적 자원을 많이 요구하고 있다. 또한 가시적인 작물의 형상 변화를 이용하여 작물의 상태를 파악할 경우, 작물의 이상을 발견하고 대처하는데 적절한 시기를 놓치게 되는 경우가 많다.

식물의 생육 장애를 보다 빨리 측정할 수 있는 방법의 하나로 열영상을 이용한 식물의 온도 분석 방법이 있다. 원격측정의 한 방법인 열화상과 디지털 영상분석은 식물로부터 나오는 적외선을 측정하여 관찰 대상 작물을 물리적으로 접촉하지 않고 연속적으로 정보를 얻고 해석하게 해준다. 원격측정에 의해 얻어진 정보는 컴퓨터에 입력·처리하여 분석과 평가가 용이하기 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 수 있다.

열영상을 이용하여 작물의 상태를 조사한 연구가 소수의 연구자들에 의하여 수행되었다. Ceccardi 등(1995)은 열영상을 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 열영상 장치를 사용하여 작물군락의 온도 분포를 조사하였는데 작물군락의 온도변화 범위는 3℃ 이하인 것으로 나타났다. Hashimoto 등 (1984)은 열영상 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 나무의 건강정도를 분석하였는데 전문가의 항공 사진 분석을 통한 건강 정도 등급 판정과 매우 유사한 결과를 얻었다.

본 연구에서는 시설재배시 부적합한 생장환경에서 유발되는 작물의 상태 변화를 감지할 수 있는 작물 감시 시스템의 개발 가능성을 구명하기 위하여 작물의 영양분 스트레스와 잎 온도 변화와의 관계를 구명하였다.

## 1. 재료 및 방법

### 가. 열영상 장치

작물의 온도 변화를 관측·분석하는데 기본이

되는 작물의 열화상을 획득하기 위하여 열 영상 처리 장치를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 열 영상 처리 장치는 서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업과학공동기기센터(NICEM)에서 보유하고 있는 것으로 열화상 촬영기, 영상 처리기, 모니터로 구성되어 있다.

열화상 촬영기는 물체로부터 방출되는 적외선 복사를 측정한다. 복사는 물체 표면 온도의 함수이므로 물체의 온도를 이 복사로부터 계산할 수 있다. 물체로부터의 복사는 수은, 카드뮴, 텔루라이드 (Hg, Cd, Te)로 만들어진 적외선 감지 센서의 저항을 변화시킨다. 적외선 감지 센서의 저항 변화는 입사되는 적외선 복사의 세기에 비례하는 전압 변화를 가져온다. 여러 개의 적외선 감지 센서로 이루어진 센서 열의 전압 변화를 디지털화하여 물체의 열화상을 얻게 된다.

표 1은 실험에 사용된 열화상 촬영기의 주요 제원을 나타낸 것이다.

영상 처리기는 열영상 촬영기에 의해서 촬영된 데이터를 컬러 모니터에서 볼 수 있도록 영상신호로 변환하거나 사용자가 컴퓨터를 사용하여 분석할 수 있는 영상 파일로 변환시킨다. 또한 영상 처리기는 열영상 촬영기를 제어하고, 전원을 공급하는 역할을 한다. 영상 처리기에 의해 변환되는 영상신호는 가로 348 화소, 세로 240 화소로 이루어지며 온도에 따라 256가지의 각기 다른 의사색(pseudo-color)으로 표현된다.

### 나. 인공 작물 생육 장치

작물의 열영상을 촬영하는 동안 외부 환경을 일정하게 유지시켜 주고 외부 환경의 변화가 열영상 촬영에 영향을 미치지 않도록 하기 위해서 인공 작물 생육 장치를 사용하였다. 작물을 생육 장치

Table 1 Specifications of the thermal imager

Measurement range	-50~2000℃
Resolution	0.08℃ (at 30℃)
Spectral response	8 to 13 μm
Frame time	0.8 seconds
Manufacturer	FLIR, USA
Model	IQ 812

안에 두고, 창을 통하여 작물 생육 장치 밖에서 열영상을 촬영하도록 하였다.

본 연구에 사용된 작물 생육 장치는 광합성에 필요한 빛을 공급하는 인공광원부, 온도 및 습도 등을 적정 상태로 유지시켜 주기 위한 공기조화부, 광합성의 원료가 되는 탄산가스 농도를 높여주기 위한 탄산가스 공급부, 그리고 제어 신호에 따라 이들 작동장치를 구동하는 구동회로부로 구성된다.

작물 생육 장치의 인공 광원부의 광도 제어는 각각의 램프를 점등시키는 방법에 의해서 이루어지며, 광도의 조절범위는  $260 \sim 400 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$  이다. 온도 및 습도 환경의 제어를 위하여 가열기, 냉각기, 가습기, 송풍기 등의 공기조화장치를 사용하며, 온도  $10 \sim 38^\circ\text{C}$ , 상대습도  $50 \sim 90\% \text{RH}$  범위에서  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ,  $\pm 5\% \text{RH}$  이내로 제어가 가능하다. 또한 탄산가스 농도의 제어 정도는 각 수준에서  $\pm 30 \text{ppm}$  이내이다.

#### 다. 스트레스에 대한 작물의 반응 구명

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

식물이 흡수하여 체내에서 발견되는 원소는 92개의 천연 원소 가운데 60여개에 이르고 있으며, 그 가운데에서 질소, 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 황, 철, 망간, 아연, 구리, 붕소, 염소 등 10여개의 주요 무기 영양분이 생리적 역할을 하게 된다.

이들 무기 영양분의 생리적인 작용을 크게 간추려 보면, 세포의 원형질 및 세포막 형성물질의 공급, 세포액의 삼투압 및 산도에 대한 영향, 세포액의 완충작용, 원형질의 수화도에 대한 영향, 세포막의 투과성 관여, 과다 성분의 과잉해, 원소 상호간의 길항작용, 생리작용의 촉매작용 등을 들 수 있는데, 이와 같은 생리 작용을 하는 데 있어 식물의 요구도에 따라서 필수 원소와 유용 원소로 구분된다. 필수 원소에 속하는 영양분 중에서도 다량원소에 속하는 질소, 칼륨, 인 성분 등을 실험 대상으로 하였다.

#### 라. 실험 방법

작물의 영양분 스트레스와 그에 대한 온도 반응을 알아보기 위하여 적절한 영양분을 공급한 작물의 온도를 대조구로써 측정하였다. 작물에 스트레스를 유발시킨 뒤 열영상을 획득하여 작물의 온도 변화를 측정하였다. 스트레스에 대한 반응 구명을 위하여, 스트레스를 받은 작물의 열영상과 영양분을 알맞게 공급받은 기준 작물에서 획득한 열영상으로부터 분석한 온도의 변화를 비교하였다. 초기 실험 결과 줄기와 같은 작물 잎 이외의 온도 변화는 크게 나타나지 않았으며, 본 연구 내용을 온실 감시 시스템에 적용할 경우 작물의 잎 부분에서 열영상을 획득할 것을 고려하여 작물 잎의 온도를 측정하였다.

열영상 장치를 이용하여 온도 측정시 외부 영향을 줄이기 위하여 온도와 습도 조절이 가능한 생육장치 내에 작물을 위치하여 열영상을 획득하였다. 열영상은 작물로부터 약 30cm 떨어진 곳에서 열영상 촬영기에 의해 획득하였다. 촬영된 열영상에서 작물과 배경의 분리를 용이하게 하기 위하여 균일한 온도분포를 유지할 수 있는 스티로폼을 작물의 배경으로 사용하였다. 실험중 대기의 온도는  $25^\circ\text{C}$ , 상대 습도는  $50 \sim 60\%$ 로 유지하였다.

Hashimoto 등(1984)의 연구 결과에서 수분 부족에 따른 작물 엽온의 변화가 광에너지를 공급한 뒤 30분 이내에 모두 나타나는 것으로 조사되었으며, 또한 2시간에 걸친 본 연구의 초기 실험 결과 실험 시작 1시간 이후에는 엽온의 변화가 관찰되지 않아 측정시간을 1시간으로 설정하였다. 작물의 온도 변화를 일으키기 위해 작물 생육 장치에 설치된 할로젠 등을 이용하여 광에너지를 공급하고 광에너지의 공급이 시작된 순간부터 약 1시간 동안 매 2분 간격으로 열영상을 획득하여 시간에 따른 온도 변화를 분석하였다. 그림 Fig. 1에 작물의 온도 측정을 위한 실험장치의 구성도를 나타내었다.

실험 대상작물로 국내 시설 작물 재배면적을 조사하여 재배 면적이 넓은 오이, 고추, 상추 등 3가지 작물을 선정하였다. 오이와 상추는 파종 후 3주가 지난 모종을 사용하였으며, 제 2 본엽을 대상으로 열영상을 분석하였다. 고추는 파종 후 7주가 지난 모종을 사용하였다. 또한 인공 생육 장치 내의 작물의 생육상태를 측정하기 위하여 실험 작물 중 고추를 대상으로 각종 스트레스를 받았을

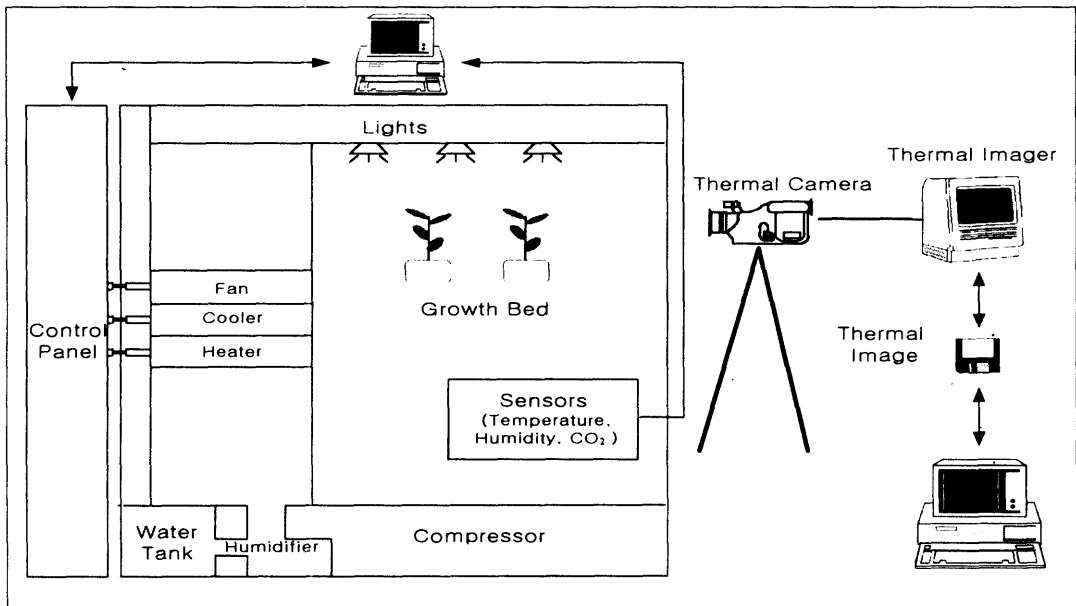


Fig. 1 Schematic diagram of the thermal image processing system.

때와 받지 않았을 때의 광합성량과 증산량을 측정하여 표 2에 나타내었다. 스트레스를 받았을 때 모든 스트레스에 대하여 광합성 속도가 감소하는 것으로 나타났으나, 증산량은 스트레스의 종류에 따라 감소하거나 변화가 없었다. 생육 장치내의 광도는  $200 \mu\text{mol/s} \cdot \text{m}^2$ 였다.

#### 마. 작물 스트레스 유발

실험 작물의 영양분 공급은 배양액을 이용하였다. 양액 재배시 사용되는 배양액 조성에는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 야마자키법에 따른 배양액(Ref.)을 사용하였다. 이 배양액은 야마자키에 의해 1982년에 개발된 것으로 10가지 이상의 작물을 대상으로 한 몇 가지 배양액 조건에서 1~2 주간씩 양액재배하여 실험기간 중 감소한 수분의 양과 각각의 흡수된 양분을 측정하여 생육에 가장 알맞은 양분 농도를 조사하는 방법으로 만든 배양액이다.

또한 영양분 스트레스를 유발시키기 위하여 야마자키법에 따른 배양액의 조성을 변화시켰는데, 배양액 조성에 포함되는 다량 원소의 적정 농도의 폭은 매우 넓으므로, Jones (1983)가 정리한 다량 원소의 적정 농도 폭에 따라 양액 조성을 변화시켰다.

Table 2 Photosynthesis and transpiration rates for the hot pepper growing experiment

	Photosynthesis rate ( $\mu\text{mol CO}_2$ $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	Transpiration rate ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ $\text{s}^{-1}$ )
Normal	53	40.29
Water deficiency	43.9	42.67
Nitrogen deficiency	37	25.42
Nitrogen excess	39	40.68
Potassium deficiency	19	47.64
Potassium excess	42	13.3
Phosphorus deficiency	47	27.4

## 2. 결과 및 고찰

### 가. 질소 스트레스에 대한 작물의 온도 반응 분석

Fig. 2는 질소 스트레스에 대한 오이의 온도 반응을 나타낸 것이다. 스트레스를 받은 작물과 스

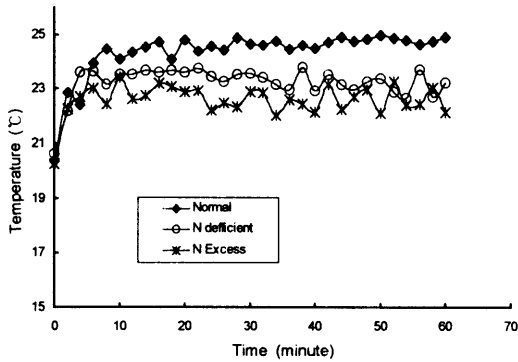


Fig. 2 Effects of nitrogen stress on leaf temperature of cucumber.

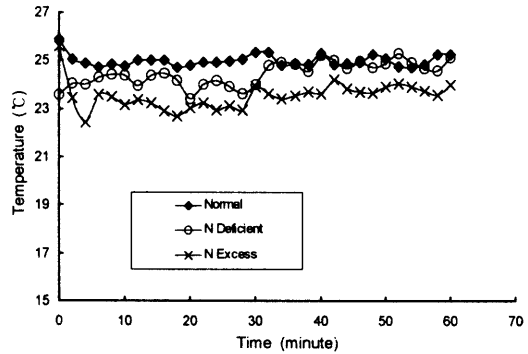


Fig. 4 Effects of nitrogen stress on leaf temperature of hot pepper.

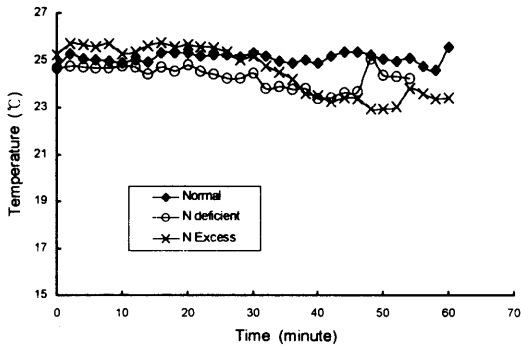


Fig. 3 Effects of nitrogen stress on leaf temperature of lettuce.

트레스를 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 생육장치의 설정 온도인 25°C로 수렴하였다. 그러나, 질소 성분이 과잉 또는 결핍된 양액을 공급받은 작물은 설정 온도에 수렴하지 못하고, 생육장치의 설정 온도보다 약 2°C 정도 낮은 23°C 근방에서 약 1°C의 진폭으로 온도가 변화하였다.

Fig. 3은 질소 스트레스에 대한 상추의 온도 반응을 나타낸 것이다. 분석 결과 질소의 결핍 또는 과잉 스트레스에 대해서 실험 시작 후 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°C 정도 낮은 약 23°C를 유지하였다. 정상적으로 영양분을 공급받은 작물은 실험이 끝날 때까지 온도가 거의 변화하지 않고 약 25°C를 유지하였다.

Fig. 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 후 약 5분 경에는 스트레스를 받지 않은 작물보다 약 3°C 정도 낮은 온도를 나타내었다. 약 20분이 지나면서 온도가 다시 상승하여 시작 후 20분 경부터 스트레스를 받지 않은 작물보다 2°C 정도 낮은 온도를 유지하였다.

#### 나. 칼륨 스트레스에 대한 작물의 온도 반응 분석

Fig. 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 서

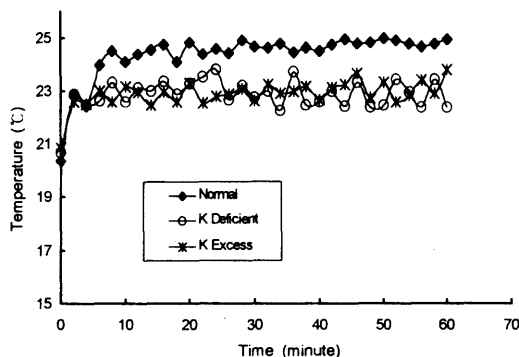


Fig. 5 Effects of potassium stress on leaf temperature of cucumber.

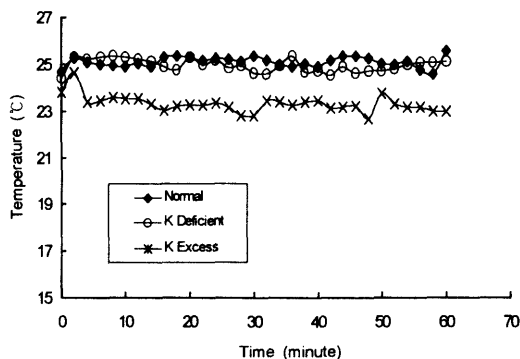


Fig. 6 Effects of potassium stress on leaf temperature of lettuce.

서히 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.

Fig. 6은 칼륨의 과잉 및 결핍에 의한 스트레스에 대한 상추의 온도 반응을 나타낸 것이다. 칼륨 결핍 스트레스에 대한 상추의 온도 반응은 정상상태의 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 정상상태의 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.

Fig. 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 온도

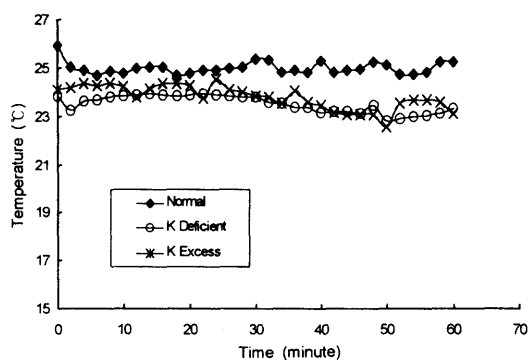


Fig. 7 Effects of potassium stress on leaf temperature of hot pepper.

는 30분이 지나면서 온도가 서서히 낮아지기 시작하여 50분 경부터는 약 23°C로 떨어져 스트레스를 받지 않은 작물과 약 2°C의 온도 차이를 보였다.

#### 다. 인 스트레스에 대한 작물의 온도 반응 분석

인의 결핍에 의해 스트레스를 받은 오이의 온도 반응은 Fig. 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 작물

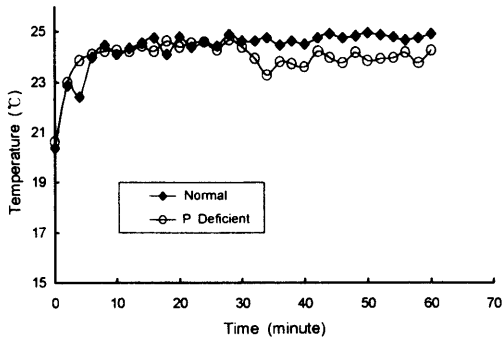


Fig. 8 Effects of phosphorus stress on leaf temperature of cucumber.

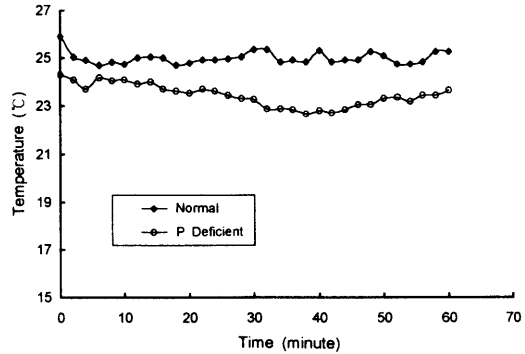


Fig. 10 Effects of phosphorus stress on leaf temperature of hot pepper.

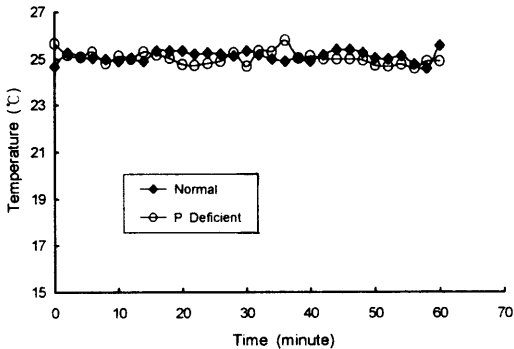


Fig. 9 Effects of phosphorus stress on leaf temperature of lettuce.

은 계속해서 생육장치의 설정온도인 25°C로 수렴하였다. 그러나, 인 성분이 결핍된 양액을 공급받은 작물은 실험 시작 후 30분이 지나면서부터 온도가 조금 내려가 생육장치의 설정 온도보다 약 1°C 정도 낮은 24°C를 유지하였다.

Fig. 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.

Fig. 10은 인 결핍 스트레스에 대한 고추의 온도 반응을 나타낸 것이다. 고추는 오이와 상추보다는 인 결핍에 의한 스트레스에 대해서 더 민감

한 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 양액을 공급받았을 때 실험 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 종료시 인 결핍 스트레스를 받은 작물의 온도는 스트레스를 받지 않은 작물의 온도보다 약 1.5°C 낮은 상태가 되었다.

일반적으로 식물이 수분 스트레스를 받았을 때 잎의 기공이 닫혀 증산량이 감소하고, 이에 따라 잠열 형태의 열에너지 방출이 줄어 식물 잎의 온도가 올라 가는 것으로 알려져 있다. 식물 성장에 필요한 영양분 중 칼륨은 특히 식물체 내의 삼투압과 기공의 개폐에 중요한 역할을 하고 있어, 칼륨으로 인한 스트레스를 받았을 때 식물의 수분 조절 기능에 이상이 생겨 스트레스를 받은 식물의 잎 온도가 정상적으로 영양분을 공급받은 작물의 잎 온도와 차이를 보이는 것으로 판단된다. 질소와 인의 과잉 또는 부족으로 인한 작물 엽온 변화의 이유에 대해서는 연구가 더 필요한 것으로 사려된다.

### 3. 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 열영상 분석장치를 사용하여 조사하였으며, 연구 결과 열영상 장치를 이용하면 작물의 상태변화를 보다 빨리 감지할 수 있는 작물 감시 시스템을 개발할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 작물 및 스트레스의 종류에 따라 서로 다른 반응을 보이므로, 보다 정확한 감시 시스템을 개발하기 위해서는 양액의 영양분 분석이 추가되어야 할 것으로 판단된다.

## 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. Inoue, Y. 1986. Remote-monitoring of function and state of crop community. *Japanese Journal of Crop Science* 55(2):261-268.
5. Jones, J. B. Jr. 1983. *A guide for the hydroponic and soilless culture grower*, Timber Press.