

따른 생장반응을 분석하기 위해서 배양액의 전기전도도, 광합성유효광양자속 및 수분부족에 대해 다음과 같이 처리하였다. 전기전도도(electric conductivity, EC) 처리는 4수준 700, 1400, 2100, 2800 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 이었으며, 광합성유효광양자속(photosynthetic photon flux, PPF) 처리는 플러그트레이 표면을 기준으로 50, 150, 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 3수준으로 설정하였다. 수분부족 처리는 실험 전체기간인 총 10일 동안 실험개시 후 1일째에만 양액 관수를 하였다. 정상 처리구는 2일에 1회씩 양액으로 관수하였다.

감자묘의 물리·화학적 환경변화에 대한 온도 변화를 관측·분석하는데 기본이 되는 열영상을 획득하기 위하여 열영상 처리 장치(IQ 812, FLIR System Co.)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 열영상 처리 장치는 서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업과학공동기기센터(NICEM)에서 보유하고 있는 것으로 열영상 촬영기와 영상 처리장치로 구성되어 있다.

영상 처리장치는 열영상 촬영기에 의해서 촬영된 데이터를 영상신호로 변환하거나 영상 파일로 변환시킨다. 또한 영상 처리장치는 열영상 촬영기를 제어하고, 전원을 공급하는 역할을 한다. 변환된 영상 파일은 가로 640화소(pixel), 세로 240화소로 이루어지며 온도에 따라 256가지의 각기 다른 색으로 표현되는 TIFF파일이다.

감자묘의 각 처리에 대한 생체정보를 분석하기 위하여 경삽 후 10일동안 발근시킨 감자묘를 사용하였다. 경삽후 11일째부터 20일째 되는 날까지 열영상 이미지를 획득하였다. 경삽 후 11일째되는 날을 열영상 획득 1일째로 하였다. 열영상 처리 시스템을 이용하여 온도를 측정할 때 외부 영향을 배제하기 위하여 폐쇄형 묘생산 시스템 내부에서 열영상 이미지를 획득하였다. 열영상 촬영기는 플러그 트레이로부터 50 cm 떨어진 곳에서 45°의 경사를 유지하며 측정하였다. 열영상 이미지를 얻을때 작물과 배경의 방사율을 유사하게 하기 위해서 스티로폼을 배경으로 사용하였고, 주변에서 반사되어 들어오는 복사열을 차단하고자 촬영체 주변은 스티로폼으로 3면을 차단하였다. 실험중 온도는 20℃, 상대습도는 70%로 유지하였다. 작물에 광원이 조사되고 3시간이 경과된 시점부터 촬영을 개시하였다. 획득된 열영상 이미지는 소프트웨어(LabVIEW Ver. 6.0, National Instruments Co.)을 이용하여 배경과 작물을 분리한 후 감자묘에 대한 식물체온의 평균값을 구하는 프로그램을 작성하였다. 작성된 프로그램은 640×240 화소의 이미지에서 분석영역(region of interest)에 해당하는 작물부분만을 선정하여 500×240 화소의 이미지로 변환시킨다. 작물과 배경의 분리를 위해서 문턱값(threshold value)을 사용하였다. 문턱값 처리로 배경과 감자잎을 분리하면 감자잎 주변에 완전히 제거되지 않은 잡상(noise)이 있으므로 미립자 제거(particle remove)를 실시하여 감자잎 보다 작은 화소수를 가지는 잡상은 제거하였다. 변환된 이미지는 배경이 모두 0의 값을 가지는 이미지가 된다. 원래 이미지의 배경 영역을 제거하기 위해 원래 이미지와 배경이 모두 0의 값을 가지는 이미지를 배열로 변환하고, 이를 순차적으로 곱하게 되면 배경영역은 모두 0의 값을 가지고 감자잎은 원래의 값을 가지는 배열이 된다. 변환이 끝난 배열을 다시 이미지로 변환하여 히스토그램(histogram)을 얻었다. 획득한 히스토그램은 각각에 대하여 텍스트 파일로 저장하였다. 열영상 처리 시스템에서 감자묘 촬영시 설정한 최소온도 8℃와 최대온

도 30℃는 저장된 이미지에서 획득한 히스토그램의 0~255의 값과 비례하게 된다. 저장된 히스토그램에 대하여 온도 범위에 맞추어 0의 값을 8℃ 255의 값을 30℃의 온도 값으로 바꾸어 평균을 구한 후 감자묘의 온도를 결정하였다. 그림 1은 본래 이미지와 감자묘의 배경을 제거한 이미지이다. 그림 2는 LabVIEW를 이용하여 개발한 감자묘의 엽온을 구하는 프로그램이다.

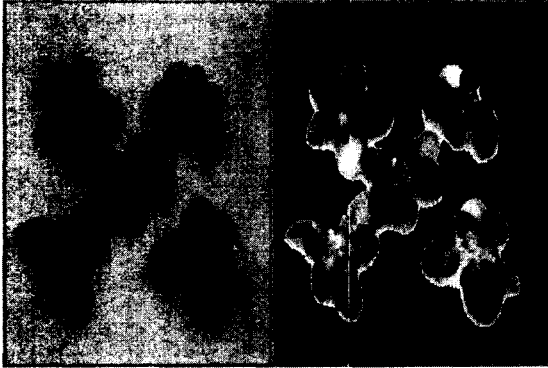


Fig. 1. Original thermal image(left) and thermal image(right) changed by thermal image processing program.

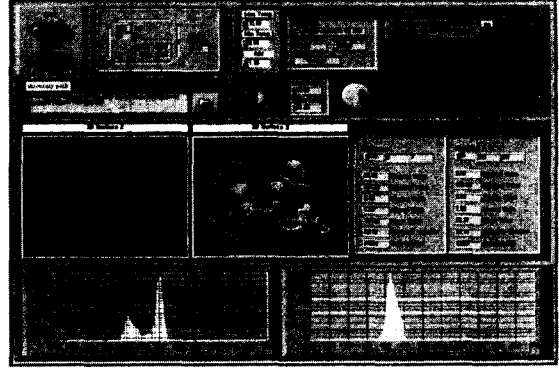


Fig. 2. Thermal image processing program using LabVIEW.

3. 결과 및 고찰

물리·화학적 환경변화가 감자묘의 엽온에 미치는 영향을 살펴보고자 경삼 후 11일째부터 1일 단위로 엽온을 측정하였다. 이미지 처리를 통해 획득한 감자묘의 엽온을 이용하여 5주에 대한 전체 엽온의 평균값을 구하였다. 그림 3은 각 처리에 대한 엽온 변화를 보여준다. 감자묘의 엽온 변화 특성은 발근이 충분히 이루어지지 못한 상태에서는 상당히 큰 엽온 차이를 나타내고 있다. 즉 측정 1일째의 각각의 엽온을 보면 $1400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 을 제외한 대부분의 배양액의 EC에서 커다란 온도차를 나타내고 있다. 발근이 이루어지는 초기에서는 배양액의 EC 차이에 의해 상당히 큰 엽온 차이를 보여주며, 발근이 충분히 이루어지면 이런 차이는 감소하는 것으로 판단된다. 측정 6일째까지 엽온이 내려가는 현상이 발생하는데 감자묘의 성장에 적절한 발근과 지상부 생장이 이루어지면서 감자묘의 엽온이 낮아진 것으로 판단된다. 엽온의 하강은 각각의 PPF과 배양액의 EC에 따라서 6일째까지는 확연히 구분되어지고 있다. 그림 3(a)는 $700 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 의 EC에서 PPF의 차이에 대한 엽온 변화를 나타낸다. $700 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 은 배양액의 EC가 낮아 지하부에서의 수분공급량이 상대적으로 다른 처리에 비하여 많이 흡수되어 낮은 엽온에서 시작한 것으로 판단된다. $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 경우 감자묘의 성장에 필요한 PPF에 비하여 낮은 것으로 판단되며 이로 인하여 배양액의 EC 변화가 특별히 엽온 변화에 영향을 주지 못하고 비슷한 엽온을 나타낸 것으로 판단된다. 하지만 광합성이 활발히 이루어진 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 과 $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 경우 엽온 차이가 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에 비

하여 상대적으로 크게 나타나고 있다. $700 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 에서 $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에 비하여 엽온이 높게 나타나고 있다. 박(2002)은 감자조직 배양묘의 담액경 재배에서 감자의 생장에 적절한 배양액의 EC는 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서는 $1500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 으로 가장 왕성한 생장이 이루어졌다고 하였는데 $700 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 의 경우 낮은 배양액의 EC를 가지게 되므로 양액에 함유된 무기염류의 양이 적어서 감자묘의 원활한 생장에 필요한 절대 영양분의 결핍으로 PPF가 증가해도 그에 따른 광합성의 증가가 이루어지지 못해 엽온 상승이 나타난 것으로 판단된다. 즉 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 과 $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 엽면적을 보면 양쪽의 엽면적은 거의 차이를 보이지 않는 것으로 나타나고 있다. 하지만 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에 비하여 $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 경우 인공광원을 통하여 엽에 조사되는 복사에너지는 약 1.6배로 상대적으로 많은 복사에너지가 전달되고 있다. 따라서 동일한 엽면적을 가진 두 처리에서 높은 복사 에너지를 받는 처리가 엽온이 높게 나타난 것으로 판단된다. 그림 3(b)는 $1400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 에서 PPF의 차이에 대한 엽온 변화를 나타낸다. 측정 1일째에 PPF에 의한 엽온 차이가 가장 작게 나타났다. 측정 6일째 이후부터 $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 엽온이 급격히 상승하는 것을 볼 수 있는데 이는 성장량이 좋은 $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 는 2일 간격의 관수로는 수분부족 현상이 나타나서 엽온이 상승한 것으로 판단된다. 관수 주기를 1일 단위로 충분히 하였다면 감자묘의 엽온은 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 과 거의 유사하거나 낮은 엽온을 나타냈을 것으로 판단된다. $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 성장한 감자묘의 경우 배양액의 EC의 차이에 상관없이 모든 처리가 성장 6일째 이후부터는 관수를 한 다음날이면 배지에 수분이 거의 없는 상태가 되어 양액 공급을 더욱 자주 하여야 했으나 동일한 실험 조건을 위하여 2일 간격으로 관수를 하여 수분 부족에 의한 엽온의 상승이 크게 나타난 것으로 판단된다. 그림 3(c)는 $2100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 에서 PPF 처리간의 엽온을 나타낸 것이다. 0일째에 엽온이 높게 나타나고 있다. 배양액의 EC가 높아서 초기 감자묘의 발근이 아직 확실히 이루어지지 못한 상태에서 지하부의 높은 염분농도는 근권부의 수분공급을 원활하게 하지 못하여 엽온 상승이 나타난 것으로 보인다. 하지만 6일째의 엽온은 $1400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 과 거의 비슷한 수준을 가지고 있다. 6일째의 엽온이 $2100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 과 $1400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 이 서로 비슷하게 나타나는 것은 두 배양액의 처리에서 엽면적을 비교하여 보면 배양액의 EC가 증가할수록 엽면적도 크게 나타나고 있다. 따라서 엽면적 증가로 인하여 증발산이 많이 이루어져 6일째에 엽온이 비슷하게 나타난 것으로 판단된다. 6일째 이후의 엽온 상승은 수분부족 현상에 의해서 나타났는데, $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 과 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 엽온이 거의 비슷하게 상승하는 것은 두 처리의 엽면적이 상대적으로 다른 처리에 비하여 컸기 때문으로 판단된다. 그림 3(d)는 $2800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 에서의 처리간 엽온을 나타내었다. $2800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 은 실험 1일째의 처리간 온도차이가 1.9°C 로 가장 많은 차이를 보였다. $700 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 의 처리에서 처럼 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 가 실험 전기간동안 다른 처리에 비하여 0.5°C 이상 낮게 유지되었다. $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 는 실험 1일째에서 10일째까지 엽온이 낮아져서 실험 마지막 날에는 18°C 가 되었다. $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 처리구중에서는 가장 낮은 엽온을 나타내었다. $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 는 5일째까지 엽온이 감소하여 17°C 가 되었으며 6일째부터 상승하였다. 마지막 10일째에

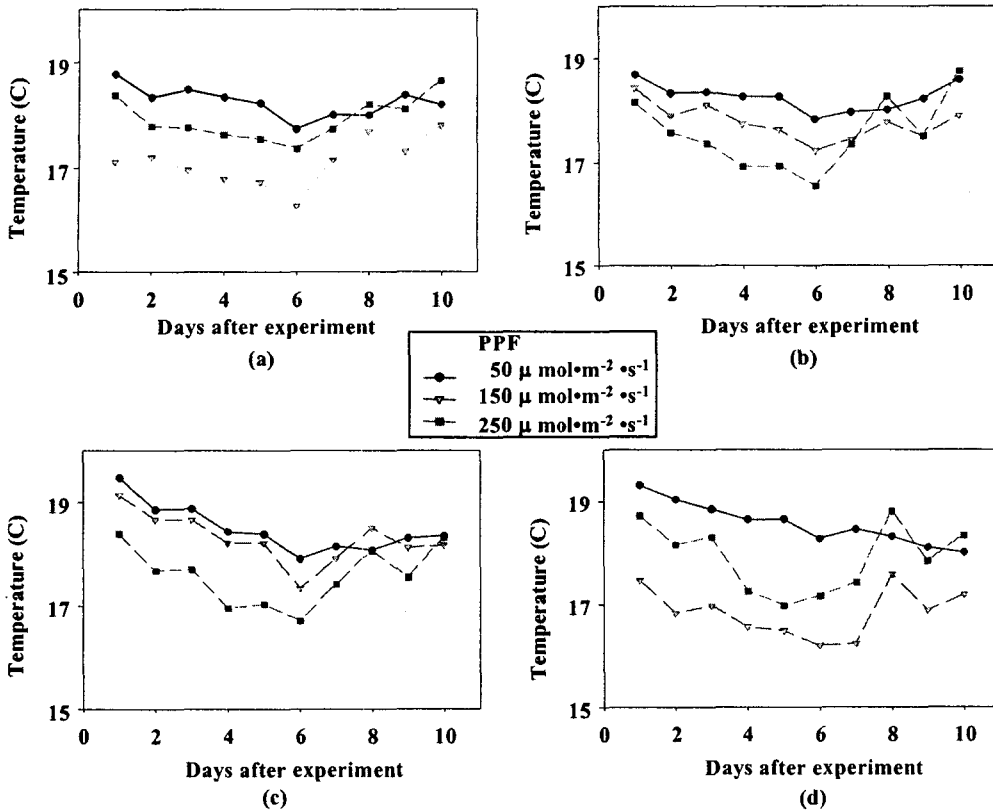


Fig. 3. Leaf temperatures of potato transplants grown at electric conductivity of (a)700, (b)1400, (c)2100 and (d)2800 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ as affected by the days after experiment and photosynthetic photon flux(PPF).

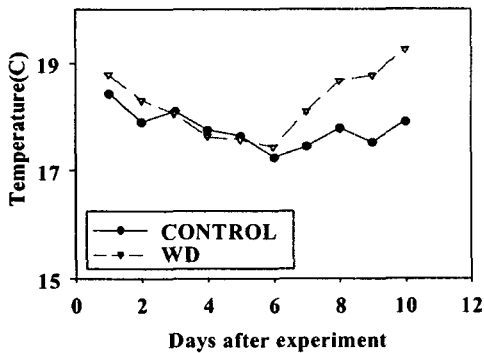


Fig. 4. Leaf temperatures of potato transplants grown at electric conductivity of 1400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ as affected by the days after experiment and water deficiency(WD).

150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 와 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 는 17.2 $^{\circ}\text{C}$ 와 18.3 $^{\circ}\text{C}$ 를 나타내었다. 그림 4는 정상적으로 시비한 처리와 실험 전체 기간동안 0일째에 한번 시비한 처리의 엽온을 나타낸 것이다. 실험 1일째에 정상 처리구는 18.4 $^{\circ}\text{C}$, 시비가 부족한 처리구는 18.8 $^{\circ}\text{C}$ 를 나타내었다. 다른 처리들과 유사하게 실험 6일째까지 온도가 낮아졌으며 7일째부터 온도가 상승하였다. 수분이 부

족한 처리구는 그렇지 않은 처리에 비하여 온도상승의 폭이 커서 6일째에서 10일째까지 1.8℃ 상승하였으며, 대조구는 0.7℃ 상승하였다. 다른 작물에 수분부족에 대한 김(1998)의 연구와 마찬가지로 수분부족 현상이 나타나면 엽온이 상승하여 대기온도와 유사하게 나타났다. 경삽된 감자의 경우 발근이 확실히 이루어지지 못했기 때문에 수분부족에 의한 엽온 상승이 늦게 나타난 것으로 판단된다. 하지만 수분 부족현상을 받게 되면 성장량이 크게 둔화되어 묘소질에 많은 영향을 주게 되므로 우량 감자묘를 생산하기 위해서는 적절한 수분 공급이 꼭 필요하며 관수 시기는 PPF와 배양액의 EC에 따라서 정해져야 할 것으로 판단된다. 열영상을 이용하여 감자묘의 성장상태를 발근과정에서 측정하여 본 결과 감자묘의 발근이 충분히 이루어진 측정 6일째 이후부터는 매일 양분을 공급해 주어야 할 것으로 판단된다. 하지만 감자의 경우 품종에 따른 편차가 크기 때문에 품종별 양액의 편차를 두어야 할 것으로 판단되나, 공시품종인 대지의 경우 엽분배에 의한 장해가 크게 나타나지 않는 것으로 판단되어 생장을 원활하게 하기 위해서는 PPF에 따라 배양액의 EC는 다르게 사용하여 공급하는 것이 적당할 것으로 판단된다. 또한 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 의 처리는 다른 PPF에 비하여 상대적으로 높은 엽온을 나타내고 있으며 성장량이 상대적으로 작은 것으로 나타나 감자묘 생장에 적당하지 않은 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

모든 처리에서 측정 6일째까지 엽온이 낮아졌다. 엽온이 낮아지는 이유는 경삽 후 감자묘의 발근이 이루어지며 광합성 활동에 필요한 수분을 충분히 공급할 수 있게 되므로 엽에서의 증발산량이 많아져서 엽온이 낮아진 것으로 판단된다. 경삽에 사용된 모주의 상태에 따라서 조금씩 다르겠지만, 감자묘의 지하부 발달이 충분히 이루어지는 시점은 엽온이 가장 낮아진 경삽 후 16일째로 판단된다. 수분부족 처리의 경우 7일째부터 온도가 상승하여 19℃ 이상으로 올라갔는데 작물은 수분이 부족하면 기공이 닫히며 광합성 활동을 중단하여 대기온도와 비슷하게 유지되기 때문이다. 열영상처리 시스템을 이용하여 감자묘의 묘소질을 분석하려 하였으나 측정 6일째 이후의 관수량을 적절하게 조절하지 못하여 엽온이 상승하였다. 상기의 결과를 고려할 때 묘소질이 우수한 감자묘를 대량으로 생산하기 위해서는 $150\sim 250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 의 PPF와 $1400\sim 2100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 의 EC가 확보되어야 할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 김기영, 류관희, 채희연. 1998. 열화상 정보를 이용한 온실 재배 작물의 수분스트레스 분석. 농업기계학회. 4(1):244-249.
2. 박현춘. 2002. 감자의 기내배양 및 양액재배에서 환경요인이 작물체생장과 괴경형성 및 광합성특성에 미치는 영향. 충북대학교 대학원 박사학위논문.
3. Kim, Y.H., J.K. Kim, S.H. Lee, Y.H. Choi, M.G. Lee, and H.J. Kim. 2002. Production of potato transplants under controlled environment. ASAE Paper No. 024114.