

온실작물의 관개계획의 수립을 위한 엽온의 활용

Using Leaf Temperature for Irrigation Scheduling in Greenhouse

이 남 호* · 이 훈 선**
Lee, Nam Ho · Lee, Hoon Sun

Abstract

The development of infrared thermometry has led many researchers to use plant temperatures, and specifically the temperature of the crop canopy in the field, for estimating the water stress of a crop. The purpose of this study was to evaluate the role of leaf temperature in irrigation scheduling. An experiment was carried out in a greenhouse with chinese cabbage. Leaf temperature was measured with infrared thermometry and evapotranspiration of the crop was measured by lysimeters. Influence of the difference between leaf temperature and air temperature on crop evapotranspiration was evaluated under varying water stress condition. A further objective was to evaluate the effect of other climatic variables on the relationship between evapotranspiration and temperature difference between leaf and air. A statistical model for estimating evapotranspiration using the temperature difference, relative humidity, and radiation was developed and tested. Crop water stress index was calculated using vapour pressure deficit and the temperature difference. Relations between the crop water stress index and crop evapotranspiration was tested. The index was closely related with evapotranspiration.

I. 서 론

작물의 생산량 증대와 최적의 생육조건 조성을 위해 작물의 생태를 파악하려는 노력이 계속되어 왔으며, 그 중에서도 기본적인 작물의 체온 즉 엽온과 작물의 증발산량 또는 작물의 스트레스에 관한 관심이 증대되어 왔다. 엽온은 주위의 기온과 비슷하게 변화하며 평균적으로 3°C 정도 낮다. 엽온은 각종 기상 조건 즉 일사, 풍우, 습도 등과 잎의 크기, 형태, 색 및 작물의 생리 작용 등에 의해

여 지배되므로 엽온을 나타내는 과정은 대단히 복잡하다. 대체로 엽온은 낮에는 일사와 기온에 따라 높아지며, 또 바람과 증산작용에 의해 잎의 수분이 증발하여 엽온이 떨어진다(김 등, 1994). 식물은 생물학적 또는 비생물학적 이유에 의해 성장에 나쁜 영향을 받으면 스트레스를 받게 된다. 스트레스나 질병에 의한 증상은 여러 가지로 나타날 수 있다. 물 공급이 잘 안 되거나 표피의 수분 함량의 평형이 맞지 않으면 기공이 닫히고 광합성과 증산이 줄게 되어 잎 표면의 온도가 증가한다. 또

*한경대학교 농업생명과학대학
**한경대학교 대학원

키워드 : 엽온도, 적외선온도계, 증발산량,
관개계획, 증발산량모형, CWSI

한 식물의 병든 상태는 잎이나 식물 군락으로부터 나오는 방사에너지의 양이나 질에 영향을 미친다 (이, 1998).

엽온과 증발산량과의 관계를 규명하기 위한 연구는 Bartholic 등(1970, 1972), Brown과 Rosenberg(1973), Stone과 Horton(1974), Blad와 Rosenberg(1976), Idso 등(1977), Jackson 등(1977), Idso 등(1981), O'Toole과 Hatfield(1983), Walker와 Hatfield(1983), Mitchell(1986), Peterschmitt와 Perrier(1991) 등에 의해 수행되었다. 엽온과 작물의 스트레스에 관해서는 Idso 등(1977), Jackson (1982), Azzam 등(1986), Gardner 등(1992), Yazar 등(1999), Alves와 Pereira(2000) 등이 연구를 수행하였다.

작물의 엽온(Tc)과 기온(Ta)차로부터 증발산량(Evapotranspiration)을 예측하는 방정식은 Blad와 Rosenberg(1976) 의해 에너지 수지식의 여러 형태로 제시되었다. Brown과 Rosenberg(1973), Bartholic 등(1970, 1972)은 포화수증기압차를 포함한 다른 형태의 에너지 수지 방정식을 이용하였다. 관계계획을 위해 하루 한번 측정된 Tc-Ta로 ET를 산정하는 것은 관계계획의 수립에 효과적인 일이라 할 수 있는데, Jackson 등(1977), Mitchell (1986), Peterschmitt와 Perrier(1991) 등은 하루 한번 측정된 엽온으로부터 ET를 산정하였다. 이런 연구의 목적은 공식을 만들어 내기보다는 각기 다른 지형, 그리고 변화하기 쉬운 수분 스트레스 상태 하에서 일증발산량과 정오에 측정된 Tc-Ta와의 관계를 평가하는 것이었다.

Idso(1977)는 작물의 Tc-Ta가 계절별 물 사용량과 작물 수확량에 관계가 있다고 했으며, 공기의 포화수증기압차, 풍속, 및 순 복사 등을 Tc-Ta를 표준화하기 위해 작물 수분스트레스(CWSI, Crop Water Stress Index)를 계산하는 모델에 첨가하였다. Idso 등(1981)과 O'Toole과 Hatfield (1983)는 이 작물 스트레스 지표는 작물의 관개시기를 결정하는 데는 사용할 수 있지만 관개량을 결정하는 데는 신뢰성이 떨어진다고 하였으나 CWSI를 이용한 관개의 간편성과 가치 때문에 이에 대

한 연구는 Gardner 등(1992), Yazar 등(1999), Alves와 Pereira(2000) 등에 의해 계속되고 있다.

국내에서도 열화상정보를 이용한 엽온을 측정하여 작물의 스트레스에 따른 작물의 온도 변화에 관한 연구(김 등, 1994)가 진행되었으나 엽온과 증발산량과의 관계나 엽온을 이용한 CWSI의 활용에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구의 목적은 적외선 온도계(Infrared Thermometer)를 이용하여 엽온을 측정하여 엽온이 증발산량에 미치는 영향을 파악하고, 토양수분 일 변화와 엽온과의 관계를 규명하며, 각 기상인자와 엽온의 관계를 밝혀 그 결과를 이용하여 증발산량 추정모형을 개발하고, 포화증기압차와 엽온과의 관계를 규명하여 이를 이용하여 작물의 물 스트레스 인자의 이용 가능성을 판단하고 이를 관계계획 수립을 위한 기초자료로 이용하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 개요

본 연구를 위한 실험은 경기도 안성시 소재 한경대학교 농촌공학과 실험포장에 설치된 온실에서 1차실험은 2000년 6월 8일~7월 20일까지 실시하였으며 2차 실험은 8월 30일~10월 6일 까지 실시하였다. 공시작물은 황금 배추로 하였으며 재배방식은 포트 재배로 하였다. 포트의 크기는 직경 25cm, 높이 30cm를 이용하였으며 총 포트의 수는 포트 4개를 1개조로 3개조 총 12개를 실시하였다. 3개조는 조별로 10일~15일 간격으로 정식하여 배추의 생장에 따른 초기 중기 후기별로 차이를 관찰하였다. 2차 실험은 1차 실험과 같은 포트 6개에 배추를 심어 측정하였다. 측정은 정오에 실시되었으며, 엽온은 SATO의 적외선 온도계(Fig. 1 참조)를 사용하여 측정하였고, 토양수분은 Time Domain Reflectometry(Fig. 2 참조)를 이용하여 측정하였다. 또한 매일 정오에 저울을 이용하여 포트별로 무게를 측정하고 일별 증발산량을 산정하였다. 온실내의 온도, 습도, 일사량 등을 측정하

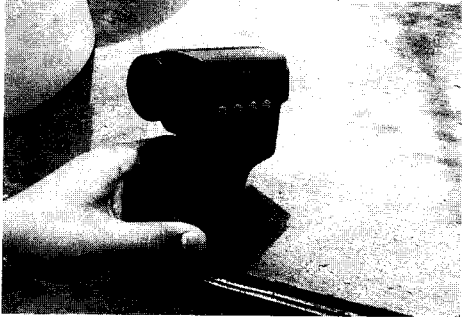


Fig. 1 Infrared thermometry

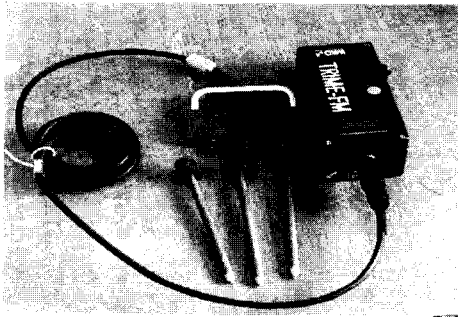


Fig. 2 Time domain reflectometry(15cm)

었다. 실험에 사용된 토양은 미농무성의 삼각좌표법에 의해 분류한 결과 양질식토(silty clay)로 나타났다.

2. 증발산량 산정식의 개발

실측된 증발산량, 엽온, 습도, 일사, 실내온도, 토양수분 등을 토대로 T_c 와 T_a 분포, 토양수분 분포, T_c-T_a 와 증발산량, T_c-T_a 와 토양수분, T_c-T_a 와 각 기상인자와의 상관관계를 분석하였다. 이 결과를 이용해서 증발산량을 산정할 수 있는 모형을 개발하였다.

3. 작물수분 스트레스 지표(Crop Water Stress Index, CWSI)

CWSI는 포화수증기압차와 식물에서 측정된 온도로부터 얻어지는 상대 증산비이다. Jackson(1981)은 태양에서부터 순수하게 방사되는 열을 잠열

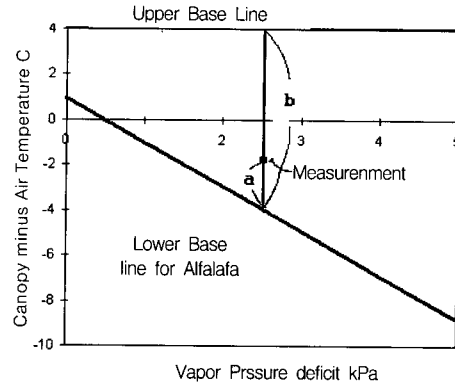


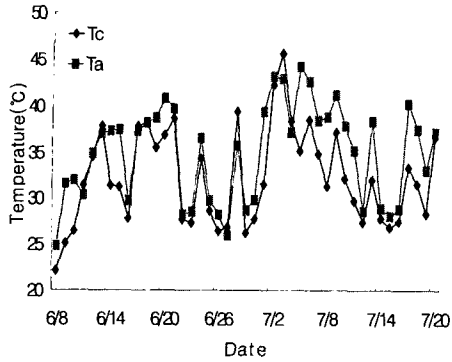
Fig. 3 Crop water stress index for alfalfa equal to a/b

(latent heat)과 현열(sensible heat)로 분리하는 이론을 발표했다. 작물이 수분 스트레스를 받게 됨에 따라 기공이 닫히고, 증산은 감소하고 엽온은 증가한다. Fig. 3은 알팔파에 대한 CWSI 계산용 도표인데, T_c-T_a 와 포화수증기압차(Vapor Pressure Deficit, VPD)와 만나는 점에서 하한경계선(Lower base line)까지를 a 라하고 점을 통과하는 상한경계선(Upper base line)에서 하한경계선까지의 거리를 b 라하며 a/b 를 CWSI라고 한다. 작물이 최대 증산할 때 CWSI는 0이고 작물이 더 이상 증산하지 않을 때 CWSI는 1이다.

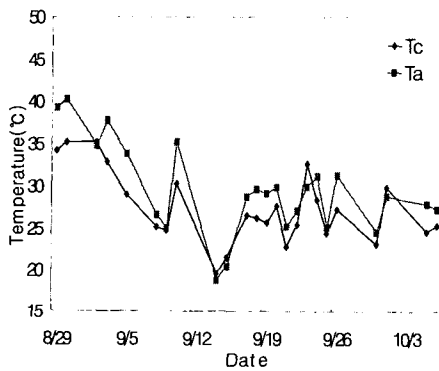
III. 결과 및 고찰

1. T_c 와 T_a 의 분포

Fig. 4(a)는 1차실험 2000년 6월8일~7월20일까지의 T_c 와 T_a 의 추이를 비교한 것이다. T_c 와 T_a 가 거의 같은 변화패턴을 나타내고 있고 대부분 T_a 가 T_c 보다 높게 나타났다. Fig. 4(b)는 8월30일~10월6일 동안 실시된 2차 실험 결과를 보여주고 있는데 T_c 와 T_a 가 같은 추이를 보이고 있으며 T_c-T_a 가 1차 실험과 비슷한 결과를 나타냈다.



(a) June 8 ~ July 20

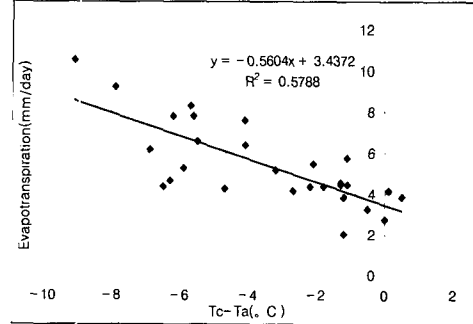


(b) August 30 ~ October 6

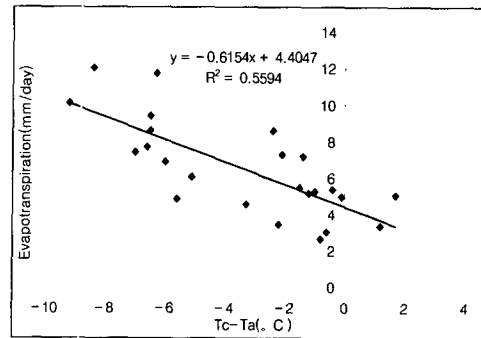
Fig. 4 Typical diurnal air temperature and canopy temperature pattern

2. Tc-Ta와 증발산량 관계

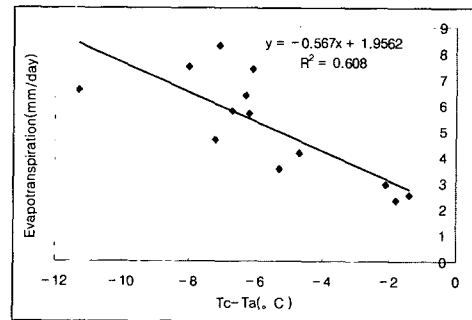
Tc-Ta를 관계계획에 활용할 수 있는지의 여부를 검토하기 위하여 Tc-Ta와 증발산량과의 상관 관계를 분석하였고 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 5는 1차 실험결과이고 Fig. 6은 2차 실험결과를 보여주고 있다. Fig. 5의 (a), (b), (c)에서 보면 정식시기에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. Tc-Ta이 증가할수록 증발산량은 감소하는데 이는 Jackson 등(1977), Mitchell과 Hanks(1984)의 연구결과와 유사하다. 상관식의 결정계수는 0.56~0.61사이의 값을 보였다. 2



(a) The first planting



(b) The second planting



(c) The third planting

Fig. 5 Tc-Ta and ET relationship in the first experiment

차 실험결과도 1차 실험결과와 유사한 것으로 나타났다. 이때 상관식의 결정계수는 0.48이었다. 1, 2차 실험결과에 의하여 Tc-Ta와 증발산량과의 상관성은 큰 것으로 나타났다. 따라서 엽온을 이용한 관계계획의 수립은 가능한 것으로 판단된다.

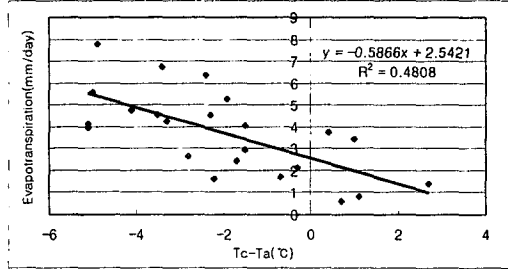
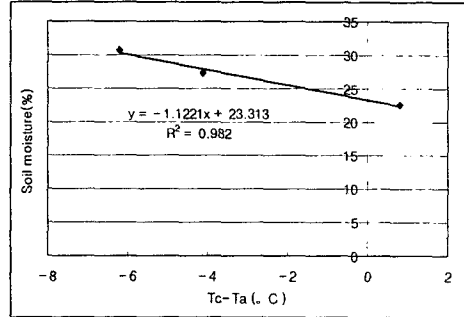


Fig. 6 Tc-Ta and ET relationship in the second experiment



(c) The Third Planting
Fig. 7 Tc-Ta and soil moisture content relationship in the first experiment

3. Tc-Ta와 토양수분과 관계

토양수분함량이 엽온에 미치는 영향을 분석하기 위해 관개후의 토양수분함량 저하에 따른 Tc-Ta의 변화에 대한 상관관계를 분석하였는데 그 결과는 1차 실험에서는 Fig. 7와 같고 Fig. 8은 2차 실험의 결과이다. 토양수분 함량과 Tc-Ta의 관계는 음의 상관관계를 보여주고 있으며 Tc-Ta 값이 음

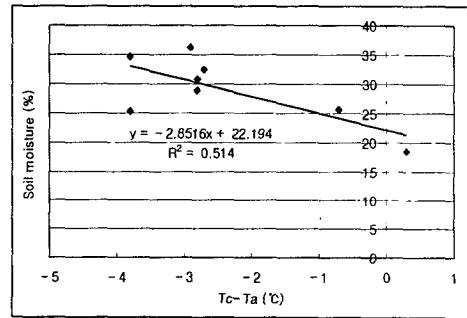
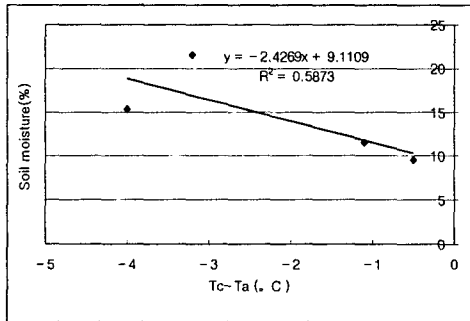
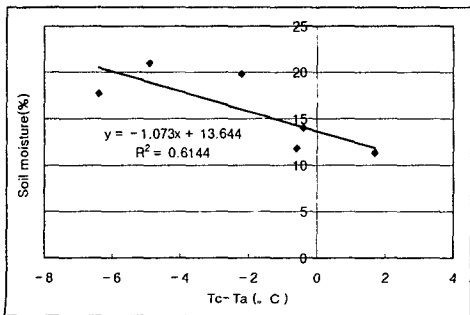


Fig. 8 Tc-Ta and soil moisture content relationship in the second experiment



(a) The first planting



(b) The second planting

으로 커질수록 토양수분 값 또한 큰 값을 보여주고 있다.

4. 증발산량 산정식의 개발

엽온과 기상인자들을 사용하여 증발산량을 산정할 수 있는 식을 개발하기 위해 Tc-Ta, 습도, 일사량을 이용하여 다중회귀분석을 실시하였다. 실측 증발산량의 값은 포트 4개의 평균값을 사용했으며 다중회귀분석 결과는 Table. 1에 정리되어 있다.

Table 1 Multiple regression analysis

class	Tc-Ta	Tc-Ta + Humidity	Tc-Ta + Radiation	Tc-Ta + Humidity + Radiation
R ²	0.578	0.446	0.795	0.801

Table 1에서 보는 것과 같이 Tc-Ta와 습도를 고려한 모형이 결정계수가 가장 낮았고, Tc-Ta, 습도 및 일사를 고려한 모형이 가장 적합한 것으로 나타났으며 다음 식과 같다.

$$ET = - 0.197 \times (Tc-Ta) + 4.577 \times Ra + 0.762 \times H + 2.4408 \dots\dots\dots (1)$$

여기서, ET = 추정 증발산량(mm/day)
 Ra = 일사량(kW/m²)
 H = 습도(%)
 Tc = 엽온(°C)
 Ta = 기온(°C)

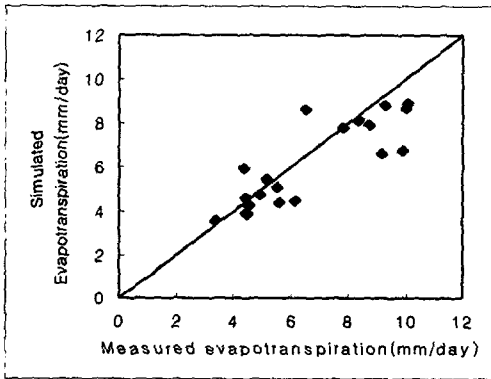
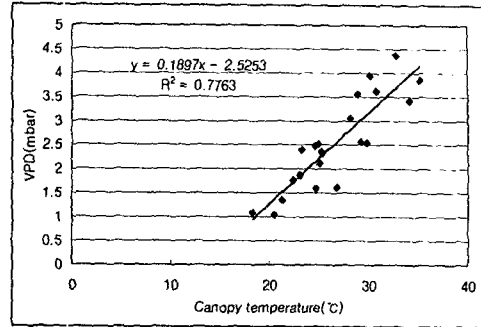


Fig. 9 Comparison of simulated and measured evapotranspiration

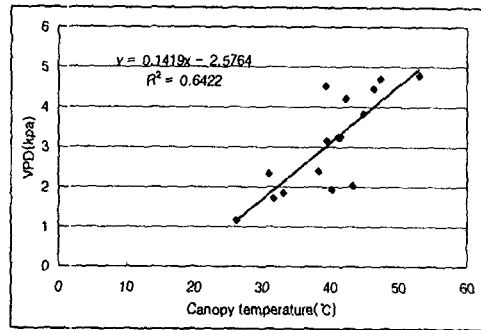
1차 실험기간(6월 8일~7월 19일)의 실측된 Tc-Ta, 습도 및 일사량 자료와 식 (1)의 회귀식을 이용하여 모의발생하였는데, 그 결과는 Fig. 9에 도시되어 있다. 이때 RMS오차는 1.04mm/day였다.

5. 엽온도와 포화수증기압차의 관계

온실내의 기온과 상대습도를 이용하여 VPD를 계산하고 그 결과가 엽온에 미치는 영향을 분석하기 위해서 상관분석을 실시하였는데 1차 실험 자료에 의한 결과는 Fig. 10(a)에 2차 자료에 의한 결과는 Fig. 10(b)에 도시되어 있다. 그림에서 보면 엽온 증가에 따라 VPD가 증가하고 있는데 이



(a) First experiment



(b) Second experiment

Fig. 10 Canopy temperature and VPD relationship

는 기온 상승에 따라 엽온과 포화 수증기압이 상승하기 때문이다.

6. 작물수분스트레스지수(CWSI)의 계산 및 활용

관개시기 및 관개량 결정을 위한 방법으로 작물의 수분스트레스를 분석하고 파악하는 일은 의미 있는 일이라 할 수 있다. 본 연구에서는 Jackson (1981)에 의해 제시되었던 계산방법을 사용하여 작물수분 스트레스지수를 계산하고 그 적용성을 검토하였다.

가. Tc - Ta 와 포화수증기압차와의 관계

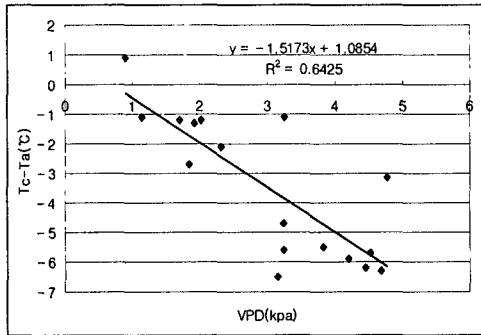
VPD와 Tc-Ta의 상관분석을 실시하고 1차 실험자료에 의한 결과는 Fig. 11(a)에 2차 자료에 의한 결과는 Fig. 11(b)에 전체자료에 의한 결과는 Fig. 11(c)에 도시하였다. Fig. 11(c)의 결과에

서 Jackson(1981)에 의해 제시된(Fig. 3 참조) 하한선(lower base line)은 $y = -1.5666x$ 로 결정하였다. Fig. 11(c)에서 보면 상관식은 $y = -1.5666x + 11.4974$ 이나 이것을 하한선으로 하는 경우에 Fig. 12에서 a값이 음수로 나타나는 경우가 생기기 때문에 극단적으로 벗어난 점은 무시하

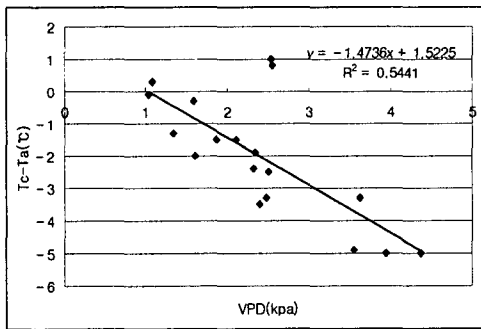
고 대부분의 측정값이 하한선의 상부에 위치하도록 상관식을 평행이동하여 하한선을 결정하였다.

나. 작물 스트레스 지수

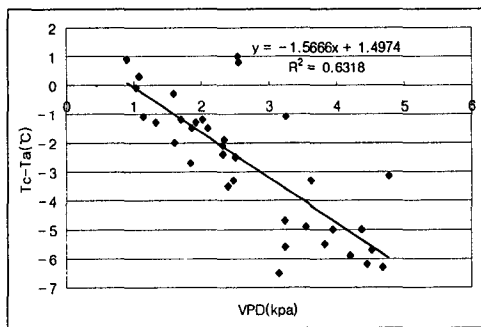
Fig. 12의 결과를 이용해서 배추를 위한 CWSI 계산용 도표를 작성하면 Fig. 13과 같다. 측정된 T_c 와 T_a 를 이용하여 VPD를 계산하고 다음 알고리즘에 의해 CWSI를 산정 하였다.



(a) First experiment



(b) Second experiment



(c) First and second experiment
Fig. 11 Tc-Ta and VPD relationship

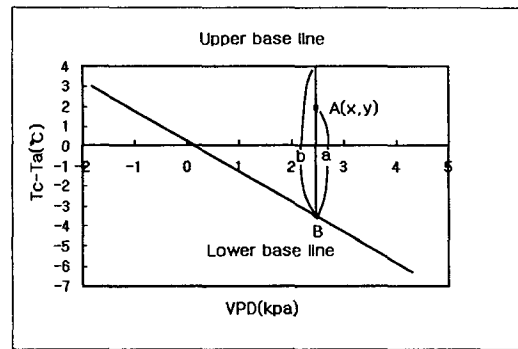


Fig. 12 CWSI for Chinese Cabbage

계산된 임의의 $T_c - T_a$ 및 VPD는 Fig. 12의 $A(x,y)$ 점으로 표시된다. A점에서 하한선까지의 거리 a는 다음과 같다.

$$a = 1.5666x + y \dots\dots\dots (2)$$

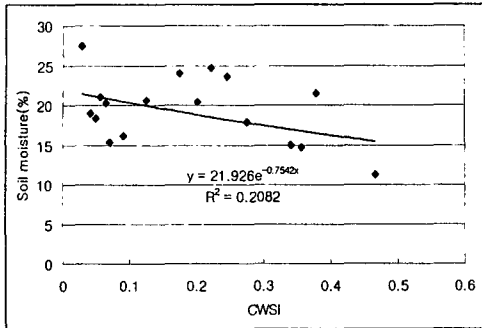
A점에서 x축에 수직선을 그어 만난점이 B이고, B점에서 상한선까지의 거리 b는 다음 식으로 구한다.

$$b = 1.5666x + 4 \dots\dots\dots (3)$$

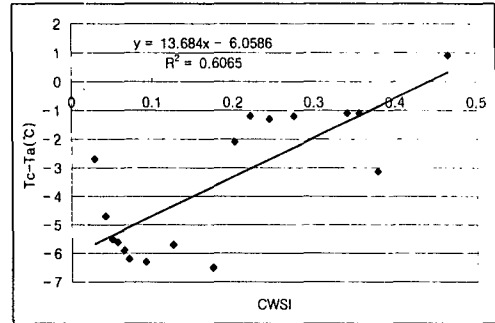
식(2)와 (3)을 이용하여 CWSI를 구하면 다음과 같다.

$$CWSI = \frac{a}{b} = \frac{1.5666x + y}{1.5666x + 4} \dots\dots\dots (4)$$

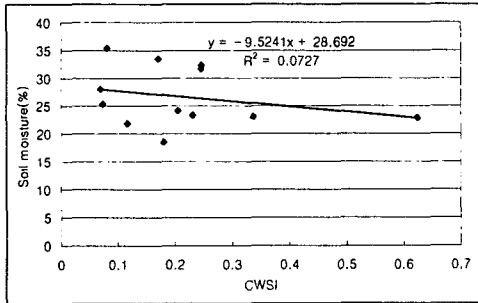
식(4)에 의해 CWSI를 계산하고 토양수분함량, 증발산량 및 $T_c - T_a$ 와의 상관성을 비교하고 그 결과를 각각 Fig. 13, Fig. 14 및 Fig. 15에 도시하였다. Fig. 13에서 보면 토양수분함량이 CWSI에 미치는 영향이 1차 실험에서는 약간 있으나, 2차 실험에



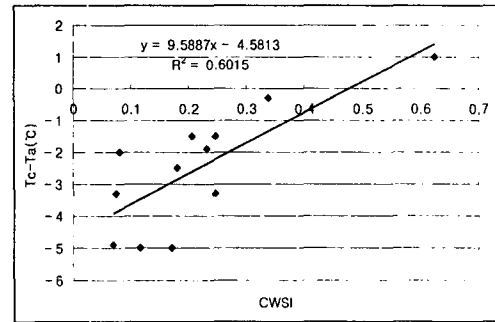
(a) First experiment



(a) First experiment



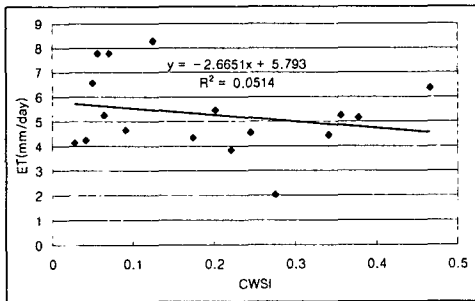
(b) Second experiment



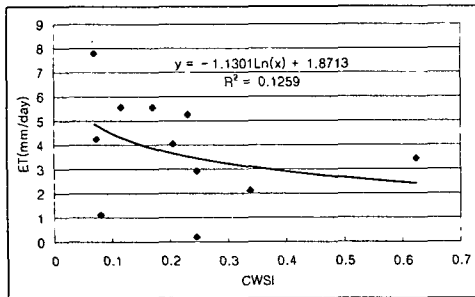
(b) Second experiment

Fig. 13 Relations between CWSI and soil moisture content

Fig. 15 Relations between CWSI and Tc-Ta



(a) First experiment



(b) Second experiment

Fig. 14 Relations between CWSI and evapotranspiration

서는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 전반적으로 토양수분함량이 감소할수록 작물의 스트레스가 증가하는 추세를 나타내고 있어 실험 결과가 어느 정도 현실적인 것으로 생각된다.

Fig. 14에서 보면 증발산량과 CWSI와의 상관관계는 거의 없는 것으로 나타났다. Fig. 15에서 보면 1, 2차 실험 모두에서 Tc-Ta가 CWSI에 미치는 영향이 상당히 있는 것으로 나타났다. Tc와 Ta와의 차가 감소할수록 CWSI의 값은 증가하고 있는데, Tc와 Ta와의 차가 적은 것은 토양수분함량이나 증발산량이 낮은 것과 관계가 있고 작물 스트레스의 증가를 의미한다. 따라서 Tc-Ta를 이용하여 작물 스트레스 지수를 계산하고 이를 관계계획의 수립에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 엽온을 계측하여 엽온이 증발산량에

미치는 영향을 구명하고, 토양수분 일변화 및 각 기상인자와 엽온과의 관계를 구명하여 증발산량 산정식을 개발하여 그 적용성을 검토하고, 작물의 물 스트레스 인자의 이용 가능성을 판단하는 것을 목적으로 실시하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Tc-Ta와 증발산량의 관계의 경우에는 대체로 Tc-Ta 값이 클수록 증발산량이 증가하였다.
2. 토양수분과 Tc-Ta는 음의 상관관계를 보이고 대체로 (Tc-Ta) 값이 클수록 토양수분 값 또한 큰 결과를 보여주고 있다.
3. Tc-Ta, 습도, 일사를 이용한 다중회귀 분석 결과를 이용하여 증발산량 산정식을 개발하였다.
4. Tc-Ta와 포화수증기압차의 관계는 Tc-Ta 값이 클수록 증가하였다.
5. 엽온과 포화수증기압차의 관계는 2차 실험 때보다 1차 실험이 다소 엽온이 높았으며 두 그래프 모두 엽온이 높을수록 포화수증기압차 또한 높아지는 결과를 보였다.
6. Tc-Ta, 토양수분, 포화수증기압차의 관계는 Tc-Ta가 클수록 포화수증기압차 값 또한 증가했으며 반대로 포화수증기압차가 큰 값을 보이면 토양수분은 떨어지는 결과를 보였다.
7. Tc-Ta를 이용하여 작물 스트레스를 나타내는 지수 CWSI를 계산하고 토양수분, 증발산량, Tc-Ta와의 관계를 분석한 결과 그 상관성은 Tc-Ta, 토양수분함량, 증발산량 순으로 높은 것으로 나타났다. Tc-Ta를 이용하여 작물 스트레스 지수를 계산하고 이를 관계 계획의 수립에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김기영, 류관희, 채희연 1994, 열영상 정보를 이용한 온실 재배 작물의 수분 스트레스 분석, 한국농업기계학회지 24(5):439~444.
2. 이양수, 1998, 적외선 복사계를 이용한 벼 근락 표면온도 측정, 한국농화학회, pp.86.
3. Alves I. and L.S. Pereira, 2000, Non-water-

stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: A new approach, Irrig. Sci. 19:101-106.

4. Azzam, A. Tabaileh, T.W Sammis, D.G. Lugg, 1986, Utilization of thermal infrathermometry of water stress in spring barley, Agricultural Water Management 12:75-86.
5. Bartholic, J. F., L. N. Namken, and C. L. Wiegand, 1970, Combination equation used to calculate evaporation and potential evaporation. USDA-ARS-41-170. pp.14.
6. Bartholic, J. F., L. N. Namken, and C. L. Wiegand, 1972, Aerial thermal scanner to determine temperatures of soils and of crop canopies differing in water stress. Agron. J. 64: 603-608.
7. Blad, B. L., and N. J. Rosenberg, 1976, Evaluation of resistance and mass transport evapotranspiration model requiring canopy temperature data. Agron. J. 68:764-769.
8. Gardner, B.R., D.C. Nielsen, and C.C. Shock, 1992, Infrared thermometry and the crop water stress index, I, History, theory, and baselines, J. Prod. Agric. 5:462-466.
9. Idso, S. B., R. D. Jackson, and R. J. Reginato, 1977, Remoto sensing of crop yields. Science 196: 19-25.
10. Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J. Jr., Reginato, R. J. and J. L. Hatfield, 1981, Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. meteorol., 24:45-55.
11. Jackson, R. D., S. B. Idso, R. J. Reginato, and P. J. Print, 1981, Canopy Temperature as a crop water stress indicator. Water Res 17: 1133 - 1138.
12. Jackson, R. D., R. J. Reginato, and S. B. Ids, 1977, Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. Water Resour. Res. 13: 652-656.

13. Mitchell A.R. and R.J. Hanks, 1984, Predicting evapotration from canopy temperature, *Advances in Evapotranspiration*, pp 114~121.
14. Peterschmitt J.M. and A. Perrier, 1991, Evapotranspiration and canopy temperature of rice and groundnut in southeast coastal India, Crop coefficient approach and relationship between evapotranspiration and canopy temperature, *Agric. For. Meteorol.* 56:273-298.
15. Stone, L. R. and M. L. Horton, 1974, Estimating evapotranspiration using canopy temperatures: field evaluation, *Agron. J.* 66: 540-545.
16. Yazar, A., T.A. Howell, D.A. Dusek, and K.S. Copeland, 1999, Evaluation of crop water stress index, for LEPA irrigated corn, *Irrig. Sci.* 18:171-180.