식물줄기의 Sap Flow의 계측 및 활용 기술

1. 서언

식물생육에 필요한 모든 물질 가운데 가장 많이 요구되는 것이 물이다. 물은 가장 많이 흡수하는 물질인 동시에 가장 많이 소실되는 물질이기도하며 또한 가장 다양한 기능을 가진 물질이기도 하다. 모든 식물은 그들의 생장과 분화과정에서 물의 공급량에 대하여 매우 예민한 반응 보인다. 이러한 민감한 반응은 고착생활을 하는 식물이 주어진 생육환경의 조건을 감수하면서 수분 결핍이나 건조로부터 스스로 보호하려는 필수적인 현상이다. 대부분 식물은 생장에 있어서 체내에 흡수한 물의 99%를 증산으로 소실하며, 남은 1%중 0.1%가 광합성과 그 밖의 생화학적 반응의 기질로서 사용되고, 0.9%는 체내의 수분으로 남아 세포의 팽압유지 역할을 한다. 또한 수분은 식물의 광합성이나 증산과 같은 여러 대사와 다양한 생리현상에 밀접하게 관여하기 때문에 식물의 생장에 없어서는 안될 중요한 요소이다.

식물에 의한 수분흡수를 일으키는 원동력은 뿌리보다는 오히려 지상부에서 생기며 흡수속도는 뿌리 자체의 생활력보다는 지상부로 부터 물을 증산하는 속도에 의하여 좌우된다. 따라서 수분이동의 주요원인은 증산작용이다. 수분이동은 토양(soil)-식물(plant)-대기(atmosphere)의 연속계(continuum), 즉 SPAC이라는 경로를 통해 일어난다(그림 1). SPAC내에서의 수분이동은 토양-뿌리-줄기-가지-엽-대기로 이어지는 과정에 있어서 각 부분의 수분 포텐셜 차이에 의해서 발생한다(표 1 참조).

수분이동은 엽에서 증산으로 수분을 잃으면 엽의 수분 포텐셜이 감소하여 부압이 생기고, 그 부압의 크기만큼 가지, 줄기, 뿌리의 통도조직을 통해 수분을 잡아당기기 때문에 수분이동이 일어난다. 이와같이 작물체에 있어서 수분상승은 증산작용에 기인하므로 이것을 증산류라고한다

보통 토양수분이 충분할 경우 엽의 수분포텐셜의 감소가 크다는 것은 증산으로 수분손실이 많다는 것을 의미하며, 이때 줄기의 증산유속이 커진다. 따라서 엽에서 단위 시간당 증산으로 잃어버린 수분량만큼 수분이 상승되기 때문에 증산유속 측정은 작물의 증산속도를 측정하는 하나의 방법된다

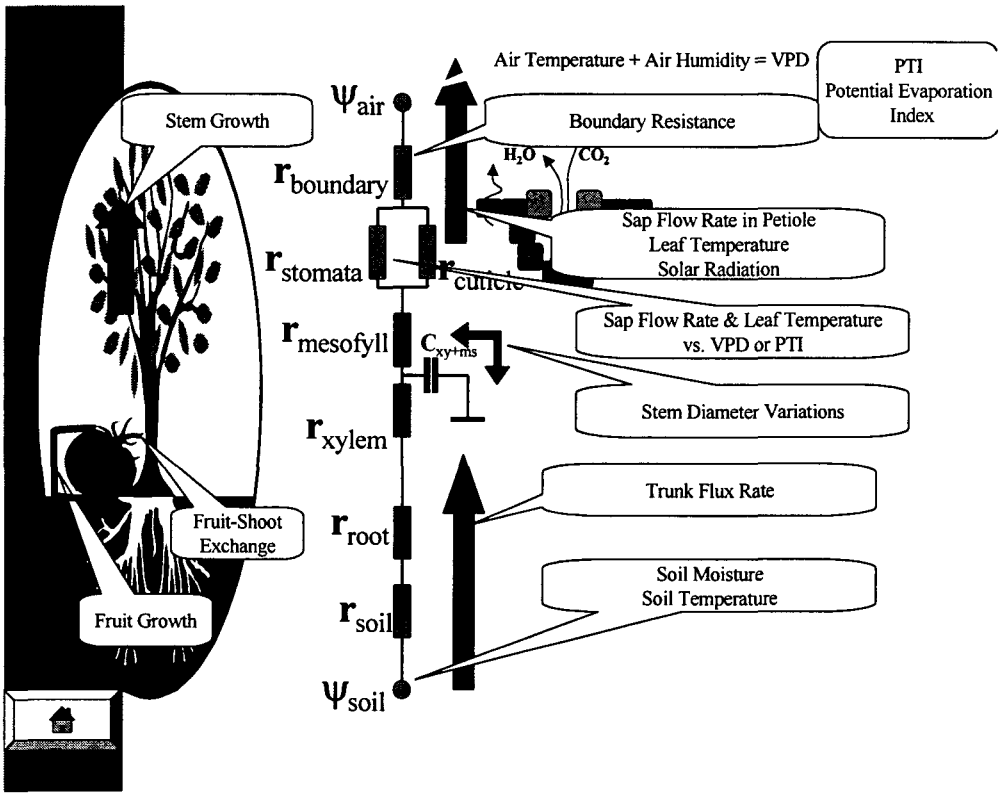

그림 1. 토양, 식물, 대기간의 수분이동관계

표 1. 토양-식물 -대기의 수분포텐셜

구 분	ψ bar	$\Delta\psi$ bar	구 분	ψ bar	$\Delta\psi$ bar
토양수분	-0.5		잎	-15	-10
뿌 리	-2	-1.5	대 기	-1,000	-985
줄 기	-5	-3			

2. 증산류 측정법 개발

식물줄기내의 증산류는 광합성기관인 잎으로 물을 공급하는 main stream일 뿐만 아니라, 양분과 대사산물의 수송도 담당하고 있다. 또한 증산은 여러가지 내적인 식물자체 요인과 외적인 환경요인 의해서 영향을 받는다. 따라서 증산류을 계측함으로써 각종 내외적 요인에 따른 식

물체의 생체반응을 얻을수있다.

식물 줄기내의 증산류을 자연상태로 정확히 측정하는 것은 식물 생리·생태의 연구분야 뿐만 아니라 농학 분야에 있어서 중요한 관심사였다. 이 때문에 많은 측정법이 개발되어 왔으나, 간편성과 신뢰성이 양립하는 방법은 적고, 대부분은 일시적인 보고에 그치고 있다.

일반적으로 증산유속을 측정하는 방법에는 흡입법, 색소주입법, 방사성동위원소법, heat pulse법등이 있다. 이들 방법은 증산유속의 지표를 나타낸다는 점에서 원리는 같으나 정도는 다르다.

이 중에서 반세기 동안 비교적 널리 사용되어 온 것은 Huber에 의해서 개발된 heat pulse법이다. 이 방법은 줄기 내에 삽입한 작은 heater에 전기를 순간적으로 흘렸을 때 발생하는 온도파의 이동속도를 온도계로 검출하여 증산류의 속도를 구하는 소위 "compensation method"이다. 이러한 초기의 연구에서는 heat pulse의 이동속도와 증산유속은 같다는 가정에서 진행하였다.

이 방법의 장점은 취급이 간편하고 증산류 변화에 따라 반응이 빠르다는 점이다. 반면에, 식물조직에 약간의 손상을 준다는 점, 절대량을 구하기 위해서는 calibration이 필요하다는 점, 측정이 간헐적으로 된다는 점이 문제이다.

한편, 열을 pulse 형태가 아니라 정상적으로 공급하는 방법이 Vieweg and Ziegler에 의해 제안되었다. 이 방법은 그 후, 수목 줄기 내의 증산류량을 구하기 위한 간열수지법의 개발로 발전되었다. Penka 등(1973)에 의한 간열수지법은 줄기 내에 삽입한 여러 개의 전극판에 의해 식물조직에 일정속도로 연속된 열량을 공급하여, 그 부위의 열수지로부터 증산류의 절대량을 구하는 방법이다. 그러나, 이 방법은 줄기에 손상을 주기 때문에 연약한 줄기를 지닌 초본식물에는 적용이 불가능하였다.

Sakuratani(1984)는 줄기 주변으로부터 열량을 공급하는 경열수지법을 제안하여 초본식물에 적합한 유량센서를 개발하였다. 이 센서는 탈착이 자유롭고, calibration 없이 보통 ±10% 정도로 줄기내 증산류의 절대량을 측정할 수 있다. 경열수지법은 식물 줄기의 일부를 일정한 열량으로 따뜻하게 했을 때, 그 부위에 성립되는 열수지식으로부터 증산류의 절대량을 구하는 방법이다. 이 방법에 의해 얻어진 경부증산류량은 보통 측정부위 위쪽에 착생하는 엽군으로부터의 증산량과 같다고 생각할 수 있다. 측정센서는 줄기에 장착하므로 실내외·맑고 흐림에 관계없이 증

산류량을 측정할 수 있다. 이 경열수지법의 장점으로는 ① 측정장치가 간이하여 측정용이 ② 절대량 측정가능 ③ 측정오차 적음 ④ 장기기록 가능등 여러장점을 가지고있으나 군락이나 광범위 면적으로부터의 증산량 측정은 현재까지 기술력으로는 어려운 실정이다.

최근에는 heat pulse법과 경열수지법을 이용한 측정센서 기기가 개발 상품화되어 판매되고 있으며, 현재 이들 센서를 이용하여 각종 식물의 증산생리반응, 관수량결정, 양수분관리, 생리장해등의 연구에 많이 이용되고있다.

가. Heat Pulse법

1) 측정원리

수목줄기내에 삽입한 소형히타에 전류를 순간적으로 공급하면, 거기서 발생한 열은 증산류에 의해 상방향으로 이동된다. 그 이동속도V를 온도계로 측정하여 증산류의 속도u를 구한다. 일반적으로 V와 u는 다음과 같은 관계식이 성립된다(Marshall, 1958)

$$u = \frac{V}{a} \cdot \frac{\rho_w c_w}{\rho_s c_s} \qquad (1)$$

여기서 a 는 물이 상승하는 부분의 비율, ρ_w와 ρ_s 은 각각 재료와 물의 밀도, C_w와 C_s는 각각 재료와 물의 비열이 된다.

森川(1974)의 실험에서 V의 비례계수는 (1)식에 일치되지 않는다고 하였다.

(1)식에서 증산류 Flux F를 구하기 위해 간단한 식을 얻을 수 있다.

$$F = \rho_b (c_w + m_c) V \qquad (2)$$

여기서 ρ_b 은 재료의 밀도(건중/생용적), m_c은 재료의 함수비이다.

F은 줄기표면에서 깊이에 따라 이차곡선으로 낮아지지만 줄기내를 상승하는 단위시간당 전류량 F_s는 다음식으로 구할 수 있다.

$$F_s = \int_0^r 2\pi (r-z)(az^2 + bz + c)dz \qquad (3)$$

여기서 r 은 형성층까지의 반경, z 은 형성층까지의 깊이, a, b, c은 경험정수이다

2)측정방법

Edwards and Warwick(1984)가 직경 43.4mm의 키위나무를 측정한 예를 보면 줄기 직경 2mm의 히타를 5, 13, 16, 24mm깊이로 삽입하고 그 위에 아래쪽 x1=5mm와 위쪽 x2=10mm의 위치에 가느다란 온도센서를 삽입하여 온도차를 측정할 수 있게 결선하였다. 히타에 순간적(1초간)으로 전압을 가해 온도펄스를 발생시켰다. 그 펄스은 최초 하방향의 센서에 도달하고, 온도차는 마이너스를 나타낸 후 상승하기 시작한다. balance점(±0)을 통과한 후에는 플러스 값을 나타내었다. 그 balance점까지 걸리는 시간 t_o로부터 $V(=(\chi_1+\chi_2)/2t_o)$를 구한다.

나.경 열수지법

1)측정원리

식물 줄기의 일부를, 조직에 영향을 미치지 않는 정도의 열량을 외부로부터 공급하여 따뜻하게 한다. 증산류가 발생하고 있을 때, 이 부위에 공급된 열량 Q[W]은 저열량을 무시하면, 다음의 3가지 구성요소로 구분된다(그림 2).

① 증산류에 의해 위쪽 방향으로 수송되는 열량, q_f[W]

② 전도에 의해 줄기의 상하 방향으로 손실되는 열량, q_d, q_u[W]

③ 가온부 표면으로부터 주위의 공기로 손실되는 열량, q_s[W]

이것을 열수지식으로 표시하면 다음과 같다.

$$Q=q_f+q_d+q_u+q_s \qquad (1)$$

그런데, q_f는 줄기 내를 상승하는 물량(F, g/sec)과 가온부 상하의 온도차(T_d-T_u, ℃)의 함수로서 표시된다. 즉,

$$q_f=c_wF(T_d-T_u) \qquad (2)$$

여기에서, T_d와 T_u는 각각 가온부 바로 위와 바로 아래의 점 x_3, x_2에서의 줄기온도 (그림 1 A 참조), c_w는 물의 비열[4.18J/g℃]이다.

q_d와 q_u는 일차원의 정상 열전도를 한다는 가정하에 각각 다음 식으로 구별할 수 있다.

$$q_d = \lambda A \frac{T_d - T_d'}{\Delta x} \tag{3}$$

$$q_d = \lambda A \frac{T_u - T_u'}{\Delta x} \tag{4}$$

여기에서, λ는 줄기의 열전도율(≒0.54W/m℃), A는 줄기의 횡단면적[m^2], T_d'와 T_u'는 각각 x_3와 x_2로부터 Δx[m] 떨어진 거리에서의 줄기온도이다.

q_s는 heater 표면에 장착한 원통형의 열류소자에 의해 평가할 수 있다. 열류소자의 기전력을 E[V]라고 하면,

$$q_s = kE \tag{5}$$

여기에서, k는 실험적으로 구해진 열류소자의 정수[W/V]이다. 위의 (1)~(5) 식으로부터 증산류량 F를 표시하는 다음 식을 얻을 수 있다.

$$F_s = \frac{Q - \lambda A \left[\frac{(T_u - T_u') + (T_d - T_d')}{\Delta x} \right] - k\Delta T}{4.18(T_d - T_u)} \tag{6}$$

즉, F는 줄기에 열량 Q를 공급하여, 그 부위 상하 각 2점에서 줄기온도를 측정함으로써 평가할 수 있다.

정수 k는 F=0인 때의 각 온도차와 E의 측정으로부터 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$F_s = \frac{Q - \lambda A \left[\frac{(T_u - T_u') + (T_d - T_d')}{\Delta x} \right]}{E} \tag{7}$$

F=0인 조건은, 측정 종료후 측정부위 상하에서 줄기를 절단함으로써 얻을 수 있으며, 그것이 좋지 않을 경우에는 야간, 특히 일출 직전 F=0라고 간주하는 것도 가능하다.

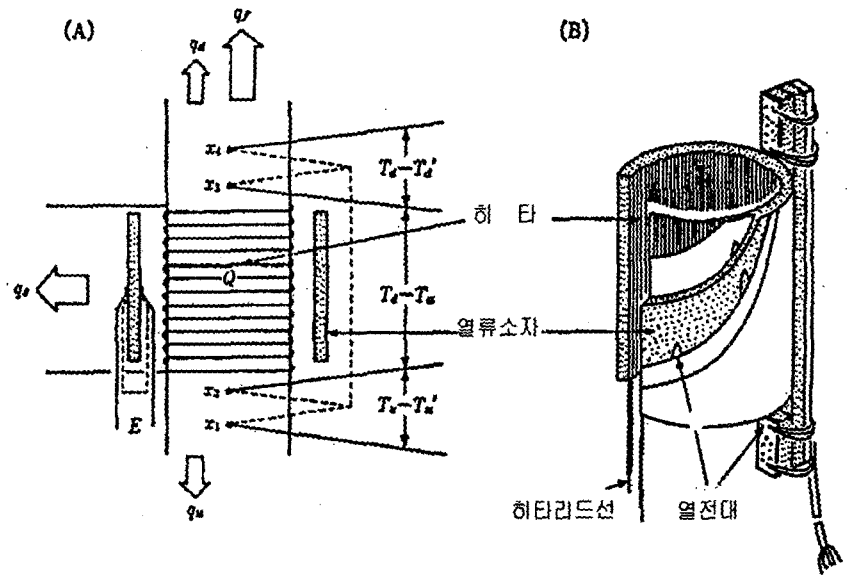

그림 2. 경 열수지법에 의한 유량측정법(A)과 유량센서 구조(B)

2)측정방법

증산류측정 probe는 기본적 측정부위를 가온하는 히타와 히타표면부터 열손실를 평가하는 열류소자 및 측온용의 열전대로 구성된다. 이것등을 직접 경부에서 조립하여 부착시킬 수 있으나 노력이 들므로 새로운 probe를 사용하는 것이 좋다(Sakuratani, 1984).

probe를 장착할 때에는 히타 및 측온센서를 경에 잘 밀착시키는 것이 중요하다. 측정부위로 일사나 기온의 영향을 줄이기 위해서는 폭 3~4cm의 단열 시트를 측정부위에 1~2cm의 두께로 감싼후, 그 외부를 알미늄호일로 덮고, 단열 시트와 줄기와의 간극을 바셀린등으로 방수하여 비가 올때도 측정가능 하도록 한다. probe의 출력전압은 10~100μV이므로 앰프를 통하여 기록계에 접속한다

측정할 때 특히 주의를 요하는 점은 T_d-T_u의 값이 지나치게 작을 경우 F_s가 과대 평가되므로 증산활동이 활발한 일중에 이 상태가 확인될때에는 T_d-T_u가 적당히 높아질 때까지 공급전력을 높힌다. 또한 증산류량이 작은 야간에는 측정부위의 온도가 상당히 높아지므로 공급열량을 낮추어주는 것이 좋다.

다. 적용식물

경열수지법을 적용할 수 있는 작물은 온도센서 장착이 가능한 절간장을 갖고 있으며, 증산유량이 비교적 많은 식물에 한정된다. 적용할 수 있는 작물은 주로 초본식물로서 콩, 토마토, 오이, 멜론, 해바라기, 목화, 옥수수, 사탕수수를 들 수 있다. 초본성 작물중에서도 쌍자엽식물이 단자엽식물보다도 좋은 효과를 얻을 수 있데 이것은 양자의 줄기 구조의 차이에 기인한 것이라고 생각된다. 벼와 같이 증산량이 작은 작물과 과수, 수목과 같은 목본성 작물은 heat pulse법을 적용한다. 벼는 통기조직이 잘 발달되어있으므로 가온부 줄기의 온도를 정확한 측정하기 위해서는 열용량이 작은 미세 열전대선을 사용해야한다.

라. 계측상의 유의점

heat pulse법, 경열수지법 모두 줄기의 생장비대에 따라서 센서를 교환할 필요가 있다. 센서는 줄기의 생장을 방해하지 않지만, 장기간 동안의 장착은 작물에 따라서는 측정부위에 형태적 변화를 일으키는 경우가 있어 좋지 않다. 적어도 일주일에 한번정도는 위치를 변경해주는 것이 바람직하다.

계절 변화를 조사하는 경우는 측정개체를 순차적으로 갱신해 나갈 필요가 있다. heat pulse법, 경열수지법 센서 모두 직사광선에 예민하게 반응하여 오차 발생우려가 있으므로 반듯이 알미늄호일로 센서를 감싸주어야한다.

센서의 장착에 있어서는 heater면, 감온부 모두 줄기 표면에 잘 접촉시키는 것이 중요하다. 비오는 곳이나 물이 떨어지는 장소에서 사용할 경우에는 방수대책이 필요하다.

3. 측정법 활용

그림 3, 4, 5는 저자가 직접 실험을 통하여 얻은 결과이다. 연구결과를 요약하면 토마토 증산류와 일사량간에는 고도의 유의성이 인정되었으며(그림 3) 또한 엽온, 일사량, 기온, 상대습도를 근거로하여 산정한 엽의 수증기압과 대기의 수증기압과의 차(LAVPD)는 외부일사량과 고도의 정의 상관관계($R=0.92^{**}$)가 인정되었다.

또한 엽과 대기간의 수증기압 차는 경 열수지법을 이용하여 측정한

증산류(sap flow)와 고도의 상관관계(R=0.86**)가 인정되었다(그림 4). 따라서 본 실험결과 LAVPD와 일사량이 포함된 증산량 예측 모델 개발(그림 5) 가능성을 암시하고 있으며 작물의 증산량 예측모델 개발은 작물의 순간 증산속도 및 총 증산량을 현재 시각을 기준으로 산정이 가능하므로 관개제어에 실용적으로 활용될 가능성이 높은 것으로 판단되었다.

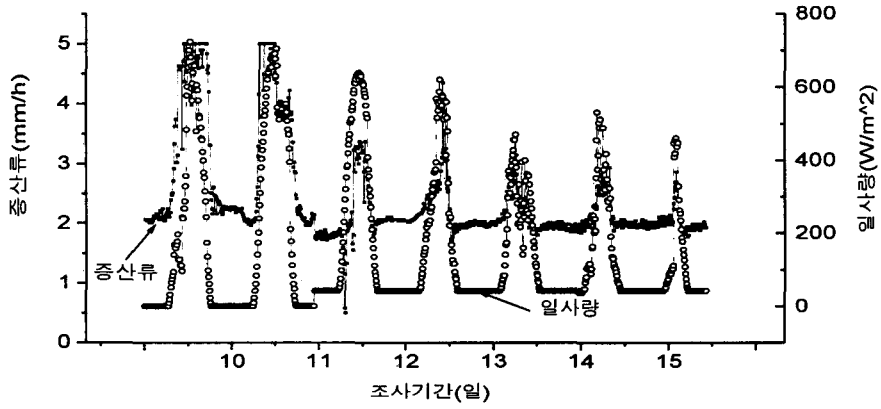

그림 3 . 일사량과 증산류의 경시적변화(토마토)

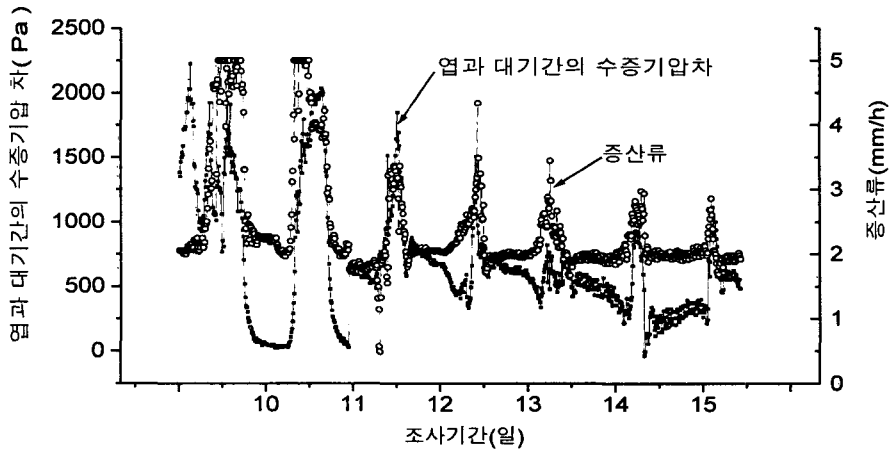

그림 4 . 증산류와 LAVD의 경시적변화(토마토)

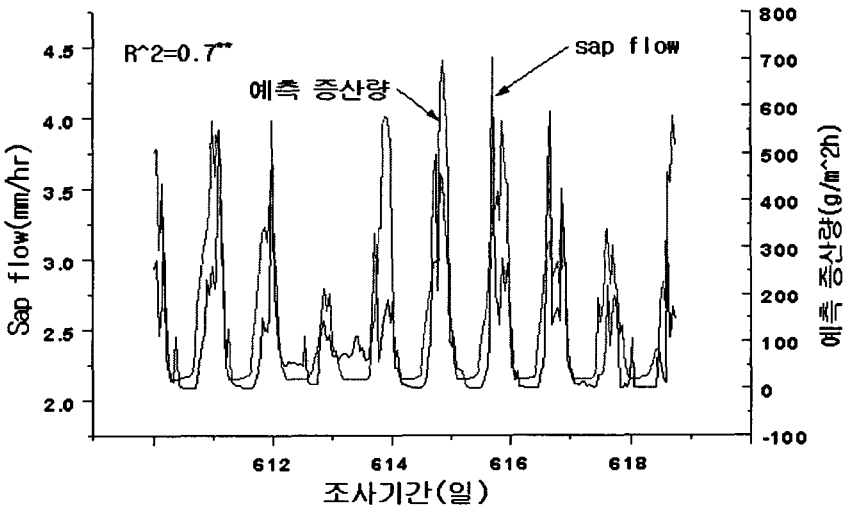

그림 5 . 예측증산량과 증산류관계

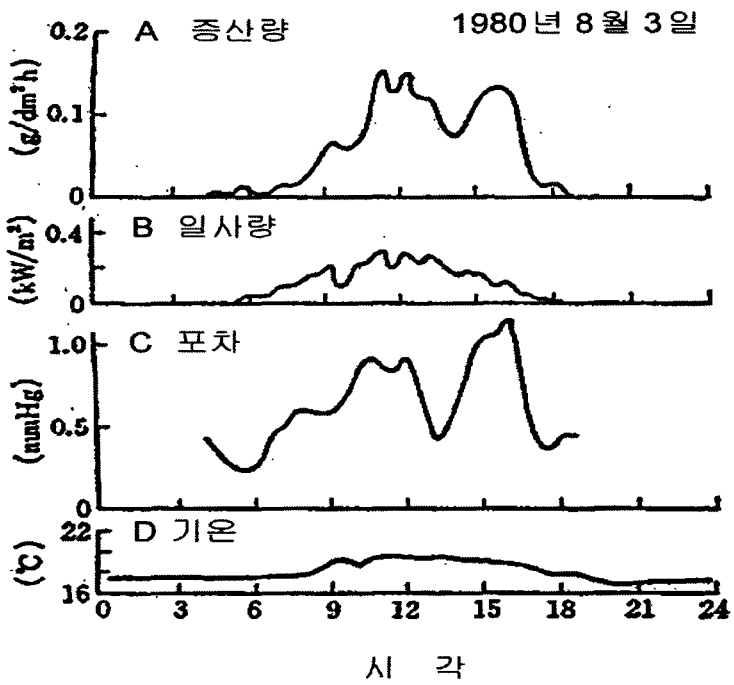

그림 6. 우천시 콩의 증산량, 일사량, 포차, 기온의 일변화

경열수지법을 개발한 Sakuratani(1984)는 그가 개발한 센서를 이용하여 콩, 오이, 사탕수수등의 연구결과를 발표하였으며 비오는 날의 증산량 유무에 대해서는, 엽면이 축축한 상태에서 엽면으로부터의 물방울 증발과 기공증산과의 분리 측정이 곤란하기 때문에 거의 알려져 있지 않았지만, 콩 줄기의 증산류를 측정하여 비오는 날에도 증산이 일어나며, 그 양은 맑은 날의 약 1/15이며, 이것은 일사보다는 포차에 영향을 받는다고 하였다(그림 6). 또한 최근에는 파프리카와 토마토에서 야간에도 증산이 일어나며 그 증산은 주로 cuticle증산이라고 하였다. 야간 cuticle증산은 주로 LAVPD(Leaf-Air Vapour Pressure Deficit)에 의해 좌우된다고 밝혔다.

4. 맺음말

줄기의 증산류는 광합성기관인 엽에 물을 공급하는 기능을 가지고 있을 뿐만 아니라 양분과 대사산물의 수송을 담당하고 있다. 또한 줄기내의 수분이동은 줄기온도 분포에 영향을 미친다. 따라서 줄기에서 증산류를 측정하는 것은 각 엽으로의 수분 분배특성 및 줄기의 열적 성질을 설명하는데 있어서 매우 유효하다. 또한 경유량센서는 양액, 관수, 관비자동화에 기초가되는 자료축적에 활용될 것으로 생각되며 작물의 성장과 수량을 예측하기위한 모델링 연구에도 필요할 것으로 생각된다. 최근 sap flow를 측정할수 있는 기기들이 상품화되어 사용되고있으나 아직 국내에서는 개발되지 못하고 있는 실정이다.

측정시 군락을 대표하는 개체의 선정이 어려워 한 두 개의 측정치로는 만족할만한 군락대표치를 얻기 어려우므로 보다 많은 측정치가 필요하게된다. 이는 곧 비용의 증가와 관리운용상의 어려움을 수반한다. 또한 측정된 자료는 군락을 대표하지 못하고 있으므로 Big Leaf 개념도입에 의한 분석이 필요하며 저렴한 국내 센서개발이 절실히 요구된다.

앞으로 sap flow측정법을 이용하여 해결해야할 과제로는 시설과 자연조건하에서의 작물의 수분소비량과 환경조건과의 관계, 작물체에 대한 물리적·화학적 처리가 증산과 뿌리의 흡수에 미치는 영향, 생체정보에 기초한 경제적 수분관리 확립등이 필요하다고 생각된다.

5. 참고문헌

櫻谷哲夫. 1982. 作物体內の蒸散量測定法の開發とその応用. 農業技術研究所報告 A29, 47-121.

森川 靖. 1972. 樹液流測定裝置と測定法. 日林誌 54:166-171.

Baker, J. M., Nieber, J. L. 1989. An analysis of the steady-state heat balance method for measuring sap flow in plants. Agric. For. Meteorol. 48, 93-109.

Edwards, W. R. N., Warwick, N. W. M. 1984. Transpiration from a kiwifriuit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman-Monteith equation. NZ. J. Agric. Res. 27-537-543.

Marshall, D. C. 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat pulse transport. Plant Physiol. 33 : 385-396.

Penka M., Cermak, J. and Deml, M. 1973. Water transport estimates in adult trees based on measurment of heat transfer by massflow. Acta Univ. Agr., Series C. 42, 3-23.

Sakuratani, T. 1981. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plant. J. Agr. Met., 37, 9-17.

Sakuratain, T. 1984. Improvement of the probe for measuring water flux rate in intact plants with the stem heat balance method. J. Agr. Met. 40(3), 273-277.

Valancogne, C., Nasr, Z.., 1989. Measuring sap flow in the stem of small trees by a heat balance method. Hortscience 24(2), 383-385.