

## 熱收支 莖流センサー에 의한 멜론 莖流量的 測定

梁元模<sup>1\*</sup> · 糠谷 明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>순천대학교 · <sup>2</sup>일본 시즈오카대학

## Measurement of Mass Flow of Water in the Stem of Musk Melon by Sap Flow Gauge

Yang, Won Mo<sup>1\*</sup> · Nukaya, Akira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sunchon National University · <sup>2</sup>Shizuoka University, Japan

### Abstract

The mass flow of water in the stem of melon measured by Sap Flow Gauge was compared with the actual flow calculated by the difference between supply and drainage nutrient water to investigate the possibility and accuracy of estimation of melon's transpiration in rockwool culture. The Sap Flow Gauge which was made with copper-constantan thermocouple and nichrome fiber by our research team, was attached to the 3rd node of melon. The outdoor temperature, room temperature, solar radiation and relative humidity were continually measured. The amount of supply and drainage nutrient water were simultaneously measured for calculation of practical consumption of nutrient water to compare with mass flow of sap. The measuring errors of Sap Flow Gauge were 0.3 to 31.8%, which were small at solar radiation of  $20\text{MJ} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ . The mass flow of water was lower for the measured value by Sap Flow Gauge than the actual value at higher solar intensity, however it was higher at lower solar intensity. The variation of error rate of each Sap Flow Gauge was 0.1 to 13.0%. The measuring error with Sap Flow Gauge was negatively related with solar intensity and temperature. Therefore, to measure more exactly the mass flow of sap for estimation of melon's transpiration, the compensation factor must be calculated.

주제어 : 관수, 광도, 경류량, 증산량, *Cucumis melo*

Kew words : water supply, light intensity, mass flow of Sap, transpiration, *Cucumis melo*

\* corresponding author

## 서론

멜론은 향기가 독특하고, 재배기간이 짧으며, 수확시의 노동력이 적게 들고, 부가가치가 높아 점차 재배면적이 늘고 있는 작물이다. 멜론재배의 성패는 네트의 양호한 형성과 당도향상에 있으며 이것은 합리적인 수분관리를 통해서만 가능하고, 합리적인 수분관리를 위해서는 멜론 수분소비량의 정확한 측정이 필수적이다.

최근 식물체내의 수분상태나 흡수되는 물의 량을 측정 또는 제어하기 위하여 레이저 경계측정센서나 열수지경류센서 등이 이용되고 있다. 특히 열수지경류센서는 줄기 속을 흐르는 물의 량을 직접 측정하므로 생육단계에 따른 수분흡수량은 물론 하루중의 시간대별로 수분소비량을 측정할 수 있다(朝倉, 1993; Baker와 Bavel, 1987; Heilman와 Ham, 1990; 梁 等, 1995a, 1995b; Valancogne와 Nasr, 1989)

이 실험은 열수지경류센서를 이용하여 측정한 멜론의 흡수량과, 급액량과 배액량을 토대로 산출한 멜론의 흡수량을 일사량과 온도 및 습도 등의 환경과 관련하여 비교 분석함으로써 온실암면재배 멜론에 있어서 경류센서에 의한 증산량추정 가능성과 그 정확도를 검증하기 위하여 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 경류센서의 원리와 구조

열수지법에 의한 경류량측정은 가해진 열량과 손실되는 열량은 일정하다는 원리(Baker와 Bavel, 1987, Valancogne와 Nasr, 1989)를 이용하여 식물체의 줄기표면에 일정한 열량을 가하고 물이 줄기 속을 흐르면서 빼앗아 가는 열량을 계산함으로써 줄기 속을 흐르는 물의 량을 측정하는 방법이다.

즉, 줄기에 가해진 열량을  $P_{in}$ 이라고 하면 이 열은 Fig. 1과 같이 4가지 방향으로 손실된다.

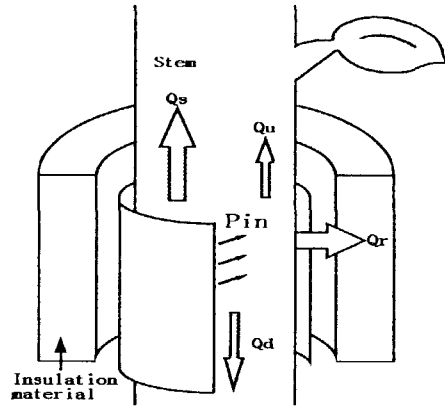


Fig 1. Heat balance in the heated stem segment

$q_s$  : 줄기속을 흐르는 물에 의해 운반되는 열량

$q_u$  : 상방향으로 손실되는 열량

$q_d$  : 하방향으로 손실되는 열량

$q_r$  : 횡방향으로 손실되는 열량

그러므로

$$P_{in} = q_s + q_u + q_d + q_r \quad (1-1)$$

식이 성립되며 1-1식은

$$q_s = P_{in} - q_u - q_d - q_r \quad (1-2)$$

로 변형할 수 있다.

여기에서 Fig. 2와 같이  $q_u$ 의 경우 점A, B의 온도차,  $q_d$ 의 경우 점C, D의 온도차,  $q_r$ 의 경우 점E, G의 온도차에 비례한다고 가정하면 히터와 열전대온도 센서를 이용하여  $q_u$ ,  $q_d$  및  $q_r$ 의 값을 측정할 수 있으므로  $q_s$ 를 구할 수 있다.

### 2. 경류량의 계산

$$q_s = C_w \cdot F \cdot T\beta \quad (2-1)$$

$C_w$  : 물의 비열 ( $\approx 4.18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$ )

$F$  : 경류속도 ( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$T\beta$  : Fig. 2에서 측정점 B, C간의 온도차 ( $\text{C}$ )

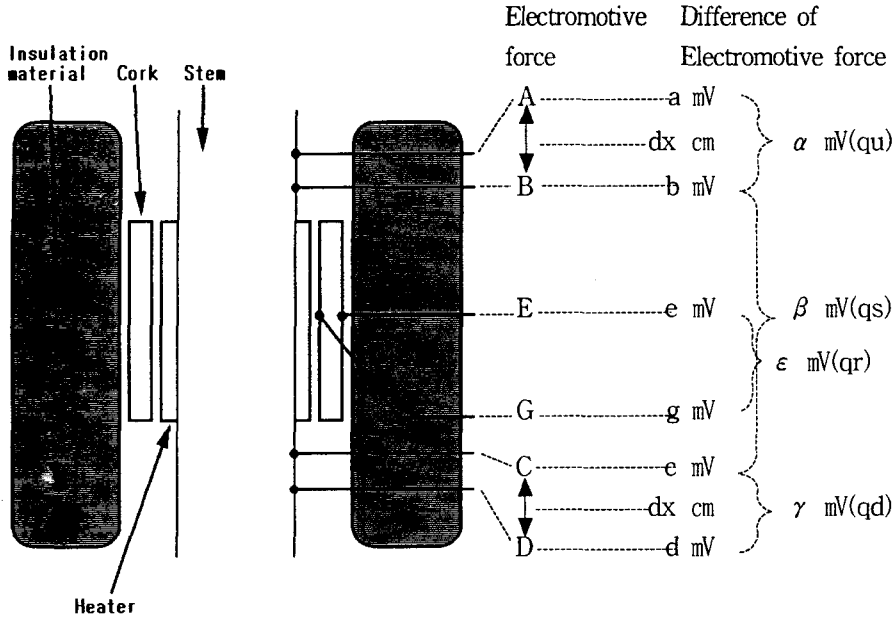


Fig 2. Measuring point of temperatures by thermocouple

의 관계가 성립되므로 이식을 경류속도 F를 구하는 식으로 변형하면

$$F = \frac{qs}{C_w \cdot T\beta} \quad (2-2)$$

가 되며, 이식에 식(1-2)의 qs를 대입하면

$$F = \frac{Pin - qu - qd - qr}{C_w \cdot T\beta} \quad (2-3)$$

로 쓸 수 있다. 여기서

$$Pin = \frac{V^2}{R} \quad (3-1)$$

V : 히터에 가해진 전압 (V)

R : 히터의 저항치 (Ω)

$$qu = \frac{\lambda \cdot s \cdot T\alpha}{dx} \quad (3-2)$$

$$qd = \frac{\lambda \cdot s \cdot T\gamma}{dx} \quad (3-3)$$

λ : 줄기의 열전도율  
(≅ 0.42 W · m<sup>-1</sup> · °C<sup>-1</sup>)  
(Steinberg et al., 1988)

s : 줄기의 단면적 (m<sup>2</sup>)

T<sub>a</sub> : Fig.2에서 dx 떨어진 a, b 간의 경온도차 (°C)

T<sub>v</sub> : Fig.2에서 dx 떨어진 c, d 간의 경온도차 (°C)

dx : Fig.2에서 a-b, c-d 간의 거리 (m)

$$qr = k \cdot \epsilon \quad (3-4)$$

k : 게이지 계수 (W/mV) (경류센서의 상하에서 줄기를 자른 다음 측정된 경류속도 값을 0으로 하여 계산한 값 즉, 식(1-1)에서 qs=0 이므로 qr=Pin-qu-qd가 되고 qr=k · ε라 하면 k=(Pin-qu-qd)/ε )

ε : Fig.2에서 e, g 간의 기전력차 (mV)

이고,

copper-constantan 열전대에서는 각각 25 · β=Tβ, 25 · α=Tα, 25 · v=Tv의 관계가 있으므로(α는 Fig.2에서 a와 b사이, β는 Fig.2에서 b와 c사이, v는 Fig.2에서 c와 d사이의 기전력차, Tβ, Tα, Tv는 각 지점간의 온도차)

식(2-3)은

$$F = \frac{\frac{V^2}{R} - \frac{25 \cdot \lambda \cdot s(\alpha + \gamma)}{dx} - k \cdot \epsilon}{4.18 \cdot 25 \cdot \beta} \quad (4-1)$$

로 변환할 수 있으며 이식을 이용하면 경류 속도  $F(g \cdot s^{-1})$ 를 구할 수 있다.

### 3. 멜론의 재배관리

멜론은 1994년 3월부터 7월까지 일본 시즈오카대학 실험포장의 3/4식 유리온실에서 재배하였다. 양액재배방식은 암면점적식으로 하였으며 멜론품종은 요코하마우에키 종묘회사의 '산-디盛夏型멜론'이었다.

종자는 1994년 3월 23일에 침종하여 25°C의 항온기에서 최아한 후 3월 25일에 암면큐브에 파종하여 주간 25-27°C로 유지하면서 표준농도의 일본원시액으로 양액육묘 하였다. 정식은 본엽 3매내외인 4월 12일 암면판에 실시하였으며 정식 후 양액은 시즈오카 처방액(다량원소: NO<sub>3</sub>-N 8, NH<sub>4</sub>-N 1, PO<sub>4</sub>-P 3, SO<sub>4</sub>-S 10, K 6, Ca 8, Mg 4 me · ℓ<sup>-1</sup>, 미량요소: Fe 1.0, Mn 0.5, Zn 0.05, Cu 0.02, B 0.5, Mo 0.05 mg · ℓ<sup>-1</sup>)으로 관리하되 20-30%가 배액되도록 하였다. 실험구 배치는 난피법 4반복으로 집구당 22주씩 총 88주를

정식하였다.

교배는 5월 10일부터 13일 사이에 인공수분하였으며 줄기는 23절위에서 적심하였다. 기타 관리는 관행에 준하였다.

### 4. 환경 및 경류량 측정

환경계측은 자기계측기(21X, Campbell Scientific)를 이용하여 외기온도, 실내온도, 실내습도 및 일사량을 시험기간 지속적으로 측정하였으며, 경류량은 동·콘스탄탄 열전대 및 견사형 망간선 등을 사용하여 자작한 경류센서와 자기계측기를 이용하여 측정하였다.

센서에 의해 계측된 경류량의 정확도를 확인하기 위하여 집구별로 22주의 실제 급액량과 배액량을 매일 오후 5시에 측정하여 멜론 1주가 1일간 소비하는 양액의 양을 계산하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 경류센서의 측정오차

열수지 센서측정 경류량과 급액량과 배액량을 비교하여 계산한 실측양액 소비량을 Table 1에 나타내었다. 일사량이 20MJ · m<sup>-2</sup>.

Table 1. Comparison between mass flow in stems measured by sap flow meter(MFS) and consumption of nutrient solution(CNS)

Date	June 21	22	23	24	25	26	27	28	29
RAD (MJ · m <sup>-2</sup> · d <sup>-1</sup> )	33.0	28.9	14.2	11.9	24.1	11.7	32.3	14.2	15.7
Daily Ave. Temp. (°C)	25.9	25.9	25.1	24.6	26.7	25.4	28.8	26.8	26.2
MFS(mℓ · plant <sup>-1</sup> · d <sup>-1</sup> )	1502	1564	1236	1070	1402	1223	1605	1437	1264
CNS(mℓ · plant <sup>-1</sup> · d <sup>-1</sup> )	1620	1636	921	730	1338	867	1610	1212	988
MFS-CNS(E)	-118	-72	315	340	64	356	-5	225	276
E/MFS×100(%)	7.9	4.6	25.5	31.8	4.6	29.1	0.3	15.7	21.8

d<sup>1</sup> 이상인 6월 21, 22, 25 및 27일에는 센서 측정 경류량과 실측양액 소비량과의 오차가 150ml·plant<sup>-1</sup> 이하의 차이를 보였으나 일사량이 20MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> 이하로 흐리거나 비가 온 날인 6월 23, 24, 26, 28 및 29일에는 센서 측정 경류량이 실측양액 소비량보다 200ml·plant<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> 이상 크게 나타났다. 이것은 경류 센서의 원리가 센서 각 부위의 열수지를 측정하여 증산량을 계산하는 것이므로 외부의 일사량이 온도에 영향을 미치고 온도가 센서의 정확도에 영향을 미치기 때문으로 생각되었다.

2. 일사량 및 온도와 측정오차와의 상관

일사량과 측정오차와의 상관관계를 보면 Fig. 3과 같다. 측정오차  $y = -20.044x + 569.77$  ( $R^2 = 0.9454^{**}$ )로 부의 상관관계를 보였으며 일사량 20MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>에서는 센서 측정 경류량과 실측양액 소비량과의 오차가 적었으나 일사량이 이보다 많아지면 많아질수록 센서 측정 경류량이 실측양액 소비량보다 적

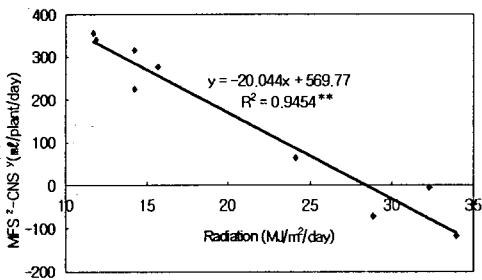


Fig. 3. Relationship between radiation and observational errors of mass flow in stems measured by sap flow meter

- <sup>z</sup> Mass flow in stems measured by sap flow meter
- <sup>y</sup> Consumption of nutrient solutions(ml/plant) = Total amounts of nutrient solutions supplied(ml) - amounts of nutrient solutions drained(ml)

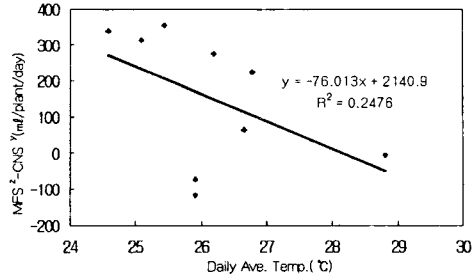


Fig. 4. Relationship between daily average temperature and observational errors of mass flow in stems measured by sap flow meter.

- <sup>z</sup> Mass flow in stems measured by sap flow meter
- <sup>y</sup> Consumption of nutrient solutions(ml/plant) = Total amounts of nutrient solutions supplied(ml) - amounts of nutrient solutions drained(ml)

어지는 경향이었고 일사량이 적어질수록 센서 측정 경류량이 실측양액 소비량보다 많아지는 경향이였다.

그러므로 경류센서의 정확도를 높이기 위해서는 가급적 센서가 일사량의 영향을 적게 받도록 단열 효과를 높일 수 있는 방법이 강구되어야 할 것으로 판단되었다. 온도와 측정 오차와의 상관은(Fig.4) 유의성이 인정되지 않았으나 일사량과 같이 부의 상관관계를 보이는 경향이였다.

센서 측정 경류량의 오차율은 최저 0.3%에서 최대 31.8%로 나타났다. 그러나 일사량 20MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>을 중심으로 일사량이 낮거나 높을 경우 오차율의 폭이 커지고 있으므로 경류센서에 의해 계측된 값에 일사량을 고려하여 보정하여야 할 것으로 생각되었으며 보정 계수에 관한 상세한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각되었다.

3. 센서간의 측정오차

센서별 측정오차를 나타낸 것이 Table 2이다. 센서별 측정 날짜의 차이가 있어 문제가 있으나 전체적으로 보면 최저 0.3%에서 최고 37.9%까지의 오차를 보이고 있는데 전술한 바와 같이 센서간 오차보다는 일사량의 차이에 따른 오차가 크게 나타났다. 센서1과 센서2의 6월 24일의 측정오차는 각각 31.8, 30.1%, 6월 25일에는 4.6, 17.6%, 6월 26일에는 29.1, 29.0%, 6월 27일에는 0.3, 6.2%, 6월 28일에는 15.7, 4.3%, 6월 29일에는 21.8, 14.9%로 최저 0.1%에서 최대 13%의 차이를 보였다.

센서간의 측정오차의 원인은 센서 자체의 차이 외에도 위에서 언급한 바와 같이 일사량과 온도의 영향을 받게되므로 센서의 설치 위치도 영향을 미쳤을 것으로 생각되었다. 그러므로 보다 정확한 경류량의 계측을 위해서는 온실내의 차광정도나 온도를 고려하여 센서의 설치 위치나 부착위치가 결정되어야 할 것으로 판단되었다.

적 요

열수지 경류센서에 의한 멜론의 흡수량 측정 오차는 최저 0.3%에서 최대 31.8% 범위 내에 있었으며, 일사량  $20MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 에서는 오차가 적었으나 일사량이 이보다 많아지면 많아질수록 센서측정 경류량이 실측양액 소비량보다 적어지는 경향이었고 일사량이 적어질수록 센서측정 경류량이 실측양액 소비량보다 많아지는 경향이였다. 센서간의 오차는 최저 0.1%에서 최대 13.0%의 오차율을 보였다. 열수지센서측정 경류량은 일사량이나 온도와 고도의 부의 상관관계를 보였다. 그러므로 이를 이용 보정계수를 산출하면 보다 정확한 멜론의 경류량을 측정할 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 2. Percentage of error $\{(MFS-CNS)/MFS \times 100\}$  of mass flow in stems measured by sap flow meter(MFS) compared with consumption of nutrient solution(CNS)

Sensor 1	Date	June 21	22	23	24	25	26	27	28	29
	Error(%)	7.9	4.6	25.5	31.8	4.6	29.1	0.3	15.7	21.8
Sensor 2	Date	June 24	25	26	27	28	29	30	July 1	2
	Error(%)	30.1	17.6	29.0	6.2	4.3	14.9	8.3	37.9	32.0
Sensor 3	Date	July 21	22	23	24	25	26	27	28	29
	Error(%)	28.6	25.0	13.5	20.2	9.8	15.6	2.6	25.7	6.5

인용문헌

1. 朝倉利員. 1993. 莖熱收支法によるメロン果實への水分移動量の測定. 園學雜. 62 : 294-295.
2. Baker, J. M. and C. H. M. van Bavel. 1987. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. Plant Cell and Environment 10 : 777-782.
3. Heilman, J. L. and J. M. Ham. 1990. Measurement of mass flow rate of Sap in *Lingustrum japonicum*. HortScience 25(4) : 465-467.

4. Steinberg, S., C. H. M. van Bavel, and M. J. McFarland. 1988. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 114 : 466-472.
5. Valancogne C. and Z. Nasr. 1989. Measuring sap flow in the stem of small tree by a heat balance method. HortScience 24(2) : 383-385.
6. 梁元模, 糠谷 明, 狩野 敦. 1995a. 溫室メロンのロックウール栽培における灌液量制御への蒸散モデル式の利用 (第1報)水蒸気密度差と擴散抵抗をパラメータとするモデルによる可能性. 日本園藝學會雜誌64(別冊1) p. 242-243.
7. 梁元模, 糠谷 明, 狩野 敦. 1995b. 溫室メロンのロックウール栽培における灌液量制御への蒸散モデル式の利用 (第2報)日射と葉水分ポテンシャルを利用するモデルの可能性. 日本生物環境調節學會第33回集會講演要旨 p. 386-387.