

온실재배 토마토에서 관개시기 진단지표로 경직경 변화를 이용한 관개 자동화 효과

신재훈* · 이변우¹

농촌진흥청 농업경영관실 · ¹서울대학교 농업생명과학대학 식물생산과학부

Effect of Irrigation Automation Using Stem Diameter Variation as an Indicator of Irrigation Timing in Greenhouse Tomato

Shin, Jae-Hoon* · Lee, Byun-Woo¹

*Informatics Division, Division Rural Development Administration, Suwon
441-707, Korea

¹Division of Plant Science, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

Abstract

The automatic irrigation system using the stem diameter monitoring and the transpiration model for the determination, respectively, of irrigation timing and amount was designed and evaluated for its applicability in pot and field culture of greenhouse tomato. In the pot culture condition, the yield and quality of greenhouse tomato were improved when irrigation was practiced based on the stem diameter monitoring and the transpiration model as compared to the irrigation practice based on soil moisture monitoring. However, the effects were not significant in the field culture condition.

주제어 : 토마토, 온실, 관개, 경직경, 자동화

Key words : tomato, greenhouse, irrigation, stem diameter, automation

* Corresponding author

서 론

최근 시설재배의 형태가 장치화, 자동화 되어감에 따라 시설 내부의 작물 생육환경을 쉽게 제어할 수 있게 되었으며, 이를 위한 합리적 기준의 설정이 관심의 대상이 되고 있다. 특히 강우가 차단된 시설 내에서의 관개는 생산물의 수량과 품질에 크게 영향을 주게 되는데, 객관적 기준에 의한 관개체제를 수립하고 이를 시스템화 하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다.(김 등, 1989; Lee와 Shin, 1998; 신, 1999; Sato 등, 1995)

최근 대규모 시설에서는 토양수분 또는 적산 일사량을 기준으로 관개하는 컴퓨터 자동관개 시스템이 사용되고 있다. 그러나 이와 같은 방식은 관개제어의 기준으로 작물의 수분상태 대신에 주변 환경 요인을 계측하여 사용하고 있어 작물의 상태를 정확히 인지하고 이에 부합하는 관개를 하기에는 미흡하다고 할 수 있다. 따라서 작물의 수분상태 및 스트레스 정도를 직접 비파괴적 방법에 의하여 계측하고, 증산과 관련된 환경요소들에 의하여 정확한 증산 소모량을 추정하여 적절한 시기에 적정량을 관개할 수 있는 정밀한 시스템의 형태가 더욱 효과적일 것으로 생각된다.

본 연구에서는 Moriya 등(1992), Sato 등(1995), 이(1997b)에 의하여 시도된 바 있는 莖直徑 변화의 非破壞的 계측 방식을 이용하여 온실재배 토마토의 수분 상태를 판단하고, 이를 적절한 관개시기의 판단지표로 사용하고자 하였다. 일회 관개시의 관개량 결정에 있어서는 그 시점의 작물의 수분 요구량이 정확히 계산되어 이에 부합하는 양을 관개할 수 있도록 하기 위하여 토마토의 수리적 성장모델(이, 1997a; c)로부터 얻어진 증산량의 추정값을 관개량 결정에 이용하였다. 이상의 관개시점과 관개량 결정방식을 마이크로

컴퓨터를 이용하여 관개제어기로 구성하였으며, 포트재배 및 포장조건에서 그 효과를 평가하였다.

재료 및 방법

1. 자동관개시스템 구성

토마토의 경직경은 6시경 해뜨는 시각에 줄기가 최대로 팽창하였다가 이후 수축하기 시작하여 15시경에 최대로 수축되고 이후 다시 팽창하는 일변화 패턴을 따르며 점차로 비대 성장을 하는데 초기에는 빠른 속도로 증가하지만 1주일 이후부터는 증가가 크게 둔화되어 약 3주 후부터는 비대가 정지된다(신, 1999). 따라서 줄기의 비대에 따라 측정지점을 상위 마디로 이동 측정하여 관개의 지표로 할 수 있도록 하였다.

본 실험에서는 하루중의 최대 경직경과 다음날의 최대 경직경의 차이를 경직경 일증가량($\mu\text{m/day}$, Daily Increment; DI)으로 정의하고, 이 값이 前日の 일사량에 대한 기대치보다 작거나 부의 값을 가질 때 관개하는 방식을 따르도록 하였다(신, 1999).

관개시점에서의 관개량은 당시까지의 증산소모량을 추정하여 적용하였는데 본 실험에서 토마토의 엽면적 증가와 증산량을 추정하기 위하여 사용한 모델은 이(1997c)가 개발한 토마토 성장 모델인 GREENTOM으로 우리나라의 시설환경에 적합도가 매우 높다. 관개제어 시스템은 경직경 변화의 모니터링에 근거하여 관개시기를 결정하고 증산모델에 의한 증산추정치를 관개량 결정에 이용할 수 있도록 제안된 최적관개 모델(이, 1997c; Lee와 Shin, 1998)을 마이크로 컴퓨터를 적용하여 구성하였다. 관개 시스템의 개략적인 구성은 Fig. 1과 같으며 자세한 것은 신(1999)과 Lee와 Shin(1998)에 수록되어 있다.

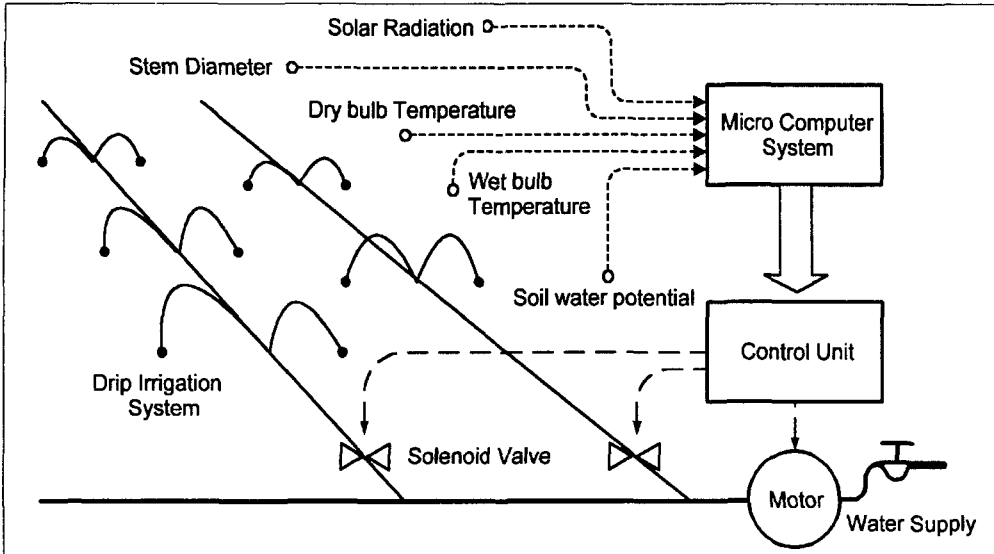


Fig. 1. Schematic diagram of automatic irrigation system

2. 토마토 재배관리 및 조사

토마토 품종 서광(瑞光)을 공시하여 30일간 육묘한 묘를 1997년 9월6일에 27cm(W)×44.5cm(L)×30cm(D)인 플라스틱 포트(Closed feeding system)에 정식하여 재식밀도가 8주/m²가 되도록 배치하고 토양증발을 방지하기 위하여 비닐로 멀칭처리를 하였다. 시비는 N-P₂O₅-K₂O 30-24-28kg/10a를 질소는 요소로 전량의 50%를 기비로 시용 하였으며, 인산은 전량 기비로, 칼륨은 염화加里로 전량의 50%를 기비로 주고 나머지는 액비로 2회 분시하였다. 온도관리는 주간에는 25℃ 이상이 되면 환기하고, 야간에는 15℃ 이상이 되도록 가온하였으며 측지는 발생하는 대로 모두 제거해 주었다. 수확은 과실이 완숙하는 대로 수시로 하였다.

포트조건과의 비교를 위하여 桃色系 토마토 품종 하우스 모모파로(桃太郎)를 공시하여 포장에서 실험을 실시하였다. 30일간 육묘한 묘를 1998년 4월 4일에 플라스틱 하우스(5M×10M) 2동에 30cm×45cm 2열로 재식밀도가 7.4주/m²가 되도록 정

식하였다. 시비량 및 환경관리는 포트실험과 동일하게 하였으며 시험구 배치는 관개방식에 따른 4개의 처리를 3반복으로 하여 2개의 플라스틱 하우스에 임의배치하였다. 실험토양은 양토로 비교적 물빠짐이 좋은 조건이었다.

포트와 포장재배 시험 각각에서의 관개처리는 Table 1과 같다. 15엽기부터 수확종료시까지 관개시점 결정방법 및 관개량을 달리하여 관개처리를 하였으며, 관개는 관개 제어 시스템에 연결된 점적관개장치를 통하여 관개개시 조건이 만족된 다음의 오전 6시를 시점으로 처리에 해당하는 양을 관개하였다. 각 처리는 어느 정도 생육이 일정하게 진행된 정식 후 약 30일 이후 과실성숙기로부터 수확완료시점까지 처리하였다. 토양수분에 의한 관개처리는 세라믹 토양수분계(藤原製作所)를 사용하여 오전 6시를 기점으로 토양수분장력이 20kPa 이상인 경우에 자동으로 관개되도록 하였다. 경직경 증가량을 기준으로 한 관개는 직접 제작한 경직경 측정센서를 이용하여 연속적으로 경직경을 모니터링하여 경직경 일증가량이 일사량으로 예측한

경직경 증가량에 비하여 일정비율 이하일 때 관개하도록 하였다. 경직경 증가량의 예측은 적산일사량(X , $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$)과 경직경 변화량(Y , μm)과의 관계식 $Y=30.1+3.6X$ 를 사용하였다(Lee, 1997).

일정량관개의 경우 90분간 3,150g/plant를 관개하였고, 증산모델에 의한 관개 처리구는 마지막 관개된 날 이후 증산개시 시점까지의 증산량 적산치만큼의 양을 관개하도록 하였다.

처리를 시작한 15엽기부터 10일 간격으로 집구당 평균적인 개체를 골라 1개체씩 3반복을 채집, 엽면적계(LI-3000, Li-cor)

로 엽면적을 측정하고, 75°C 건조기에서 2일간 건조하여 엽중, 경중, 엽병의 각 기관별 건물중을 조사하였다. 과실이 완숙하였을 때 수시로 수확하여 과실개수와 과실중을 기록하고 브릭스 당도계(PR-110, ATAGO)로 반복별로 과실 4개씩의 당도를 측정하였다. 한편 시스템에 의한 증산량 추정의 정확도를 검증하고자 군락 중앙부에 위치한 2개체에 대하여 sap flow meter(model SG10 & SG13, Dynamax Inc, Houston, Tx)를 이용하여 증산량을 측정하였다.

Table 1. Irrigation treatments in pot and field experiments in greenhouse

< Experiment 1 : pot culture >

Treatment	Irrigation method
T1	Water was applied when soil water potential dropped below -20kPa
T2	Water was applied when daily increment of maximum stem diameter around dawn was smaller than the diameter increment(Y , $\mu\text{m}/\text{day}$) estimated by the equation, $Y=30.1+3.6X$, where X =daily total solar radiation($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$)
T3	Water was applied when daily increment of maximum stem diameter around dawn was smaller than 0 μm .

* Irrigation amounts were determined by the transpiration amounts from the previous to the present irrigation time, which were estimated by the transpiration model.

< Experiment 2 : field culture >

Treatment	Irrigation method
T1	Water was applied when soil water potential dropped below -20kPa
T2, T3	Water was applied when daily increment of maximum stem diameter around dawn was smaller than 70% level of the diameter increment(Y , $\mu\text{m}/\text{day}$) estimated by the equation, $Y=30.1+3.6X$, where X =daily total solar radiation($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$)
T4	Water was applied periodically once in a week.

* Amount of water applied were fixed to 3,150g/plant except T3 which were determined by the transpiration amounts from the previous to the present irrigation time, which were estimated by the transpiration model.

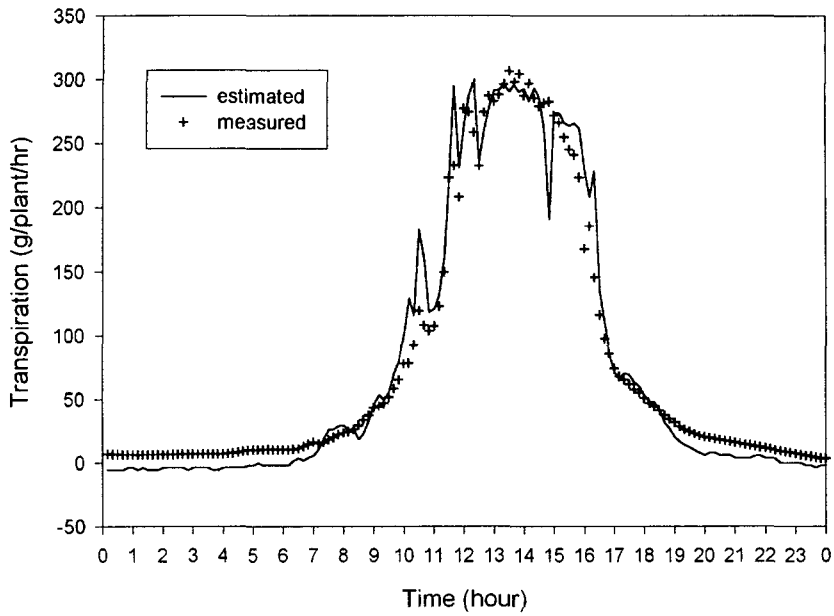


Fig. 2. Diurnal courses of measured and estimated transpiration fluxes of tomato on June 28, 1998

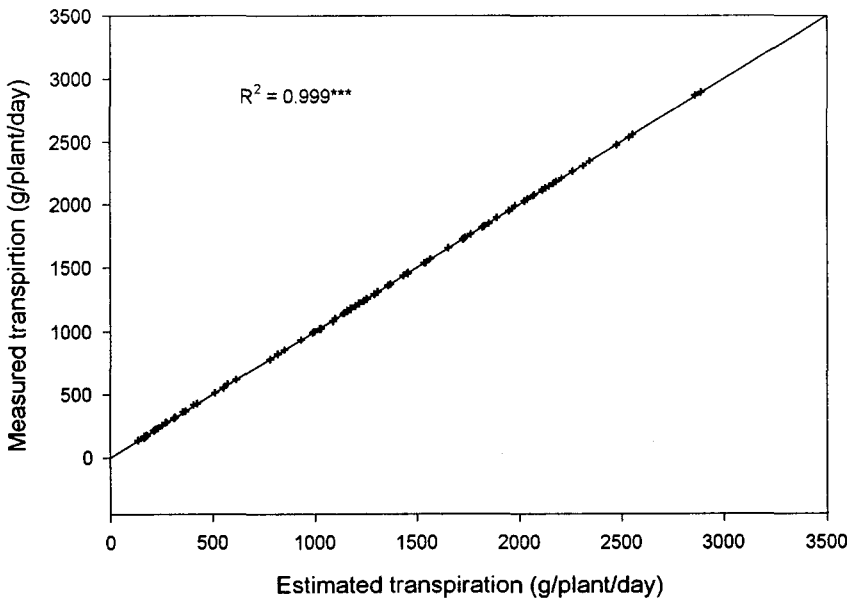


Fig. 3. Comparison of measured and estimated daily transpiration fluxes of tomato during three months in 1998

결과 및 고찰

1. 관개시스템의 증산량 예측과 실측치 비교
 본 실험에서 사용된 증산모델의 적합도를 평가하기 위하여 GREENTOM 모델로부터 계산된 증산량을 실측값과 비교하여 보았다(Fig. 2, 3). Fig. 2는 맑은 날인 1998년 7월 28일의 증산량 일변화를 sap flow meter로 실측한 것과 본 연구의 관개자동화 시스템에 의하여 예측한 것을 대비한 것이다. 예측치가 실측치에 비하여 야간에 다소 낮으나 증산이 주로 이루어지는 낮에는 매우 잘 일치하였다. 또한 Fig. 3은 실험기간중 토양수분을 -20kPa 이상으로 유지한 관개구에서의 일일 적산 증산량의 실측값과 증산모델에 의한 예측값을 대비하여 나타낸 것으로 예측치가 실측값과 잘 일치하였다. 따라서 증산량

추정에 의한 관개량 설정에 이 모델을 이용할 수 있을 것으로 판단되었다.

2 관개처리가 토마토의 수량 및 품질에 미치는 영향
 1) 포트실험

포트조건에서 관개시점 결정방법을 달리 하고 관개량은 모든 처리에서 직전의 관개시점으로부터 적산 증산량으로 한 실험 1의 경우 관개결과를 정리하면 Table 2와 같다. 총 관개량은 직전의 관개이후부터 현재의 관개까지 적산 증산량으로 하였기 때문에 처리에 관계없이 일정하였으나 관개 횟수는 토양수분에 의하여 관개한 처리 1(T1)이 14회, 일사량으로부터 추정할 일 경직경 증가 예상량의 90% 이상일 때 관개를 한 처리 2(T2)에서 25회, 일 경직경 증가량 $0 \mu\text{m}$ 이하일 때 관개한 처리 3(T3)에서 15회 관개되었다.

Table 2. Time and amount of irrigation under different irrigation management practices from Oct. 23 to Dec. 21, 1999.

Irrigation details	Treatment		
	T1	T2	T3
Irrigated days (day)	14	25	15
Total Irrigation amount (g/plant)	12,578	12,578	12,578
Average Irrigation Interval (day)	2.86	1.60	2.67
Average Irrigation amount at once (g/plant)	898	503	836

다음 Table 3과 Table 4는 관개처리에 따른 각 기관별 건물중과 수량을 나타낸 것이다. 건물중은 수확완료 후 각 처리당 반복별로 12개체를 채집하여 조사하였다. 지상부 건물중과 수량은 처리에 따른 차이가 5% 유의수준에서 유의하지 않았으며 과실수에서만 차이가 인정되었다.

그러나 작물에 수분 스트레스의 영향이 확인하지 않은 시점에서 미리 관개됨으로써 결과적으로 너무 자주 관개되어 한 번에 충분한 양을 관개하지 못하였던 처리 2(T2)의 경우를 배제하고 처리 1(T1)과

처리 3(T3)만을 비교하였을 때 경직경 변화에 근거한 관개 처리가 관행의 주기적 관개에 대하여 수량 및 품질의 향상효과가 존재한다는 연구 가설에 대한 검증결과 p값은 당도, 수량, 과실수에 대하여 각각 0.0049, 0.0504, 0.0239로 유의수준 5%에서 일부 유의한 결과를 얻을 수 있었다(Table 5). 즉 일 경직경 증가가 $0 \mu\text{m}$ 이하로 수분 스트레스의 영향이 확연히 나타날 시점에서 관개한 처리 3이 토양수분 장력에 의한 관개인 처리 1과 비슷한 횟수의 관개가 이루어졌음에도 수량이 높았

던 사실로 비추어 보아 경직경에 의한 관개시점의 결정이 식물체의 수분요구에 더 적절히 부응하는 방식으로 판단되며, 수량 뿐 아니라 당도증가에 있어서도 적절한 관개가 유효한 것으로 생각된다. 이상과

같이 관개수의 유실이 없는 포트조건에서 작물의 생체정보를 관개제어에 이용한 결과 수량과 당도증가에 효과가 있는 것으로 보인다.

Table 3. Dry weight and LAI of tomato irrigated with different method of irrigation timing and amount in pot culture.

Treatment	Dry weight(g/plant)				LAI
	Leaf	Petiol	Stem	Total	
T1	43.0	20.9	30.0	93.9	9.2
T2	44.0	21.9	31.4	97.3	9.4
T3	46.1	23.7	33.9	103.7	9.2
F-value	ns	ns	ns	ns	ns

ns: not significant at 5% probability level.

Table 4. Fresh fruit yield and Brix degree of tomato irrigated with different method of irrigation timing and amount in pot culture.

Treatment	Brix (°Bx)	Yield (kg/10a)	Fruit number(/10a)
T1	6.00a	1,108	12,667
T2	5.95a	1,146	14,000
T3	6.73b	1,462	18,444
F-value	6.70	3.92	5.73
p-value	0.0018	0.0814	0.0406

a, b: separation of treatment mean by DMRT at 5% level.

Table 5. Comparison of Fresh fruit yield and Brix degree of tomato between treatment 1(T1) and treatment 3(T3) in pot culture.

Treatment	Brix (°Bx)	Yield (kg/10a)	Fruit number(/10a)
T1	6.00	1,108	12,667
T3	6.73	1,462	18,444
F-value**	8.49	7.67	12.56
p-value**	0.0049	0.0504	0.0239

** p-value: probability from one side test

2) 포장실험

포장에서의 실험 결과는 포트실험의 결과와 다소 차이가 있었다. 토양에서는 지하수의 공급, 수분의 유실이 있으므로 증산량 만큼의 관개 외에도 일정량을 관개하도록 하는 처리를 두었다. 제15엽기부터 수확이 종료될 때까지 즉 5월 4일부터 7월 31일까지 관개된 결과는 다음 Table 6과 같다. 토양수분에 의한 관개인 처리 1(T1)과 증산모텔과 DI 기대치의 70% 수준의 증산량 만큼 관개한 처리 3(T3)이 거의 비슷한 양이 관개되었으며 DI 기대치의 70% 수준에서 일정량을 관개한 처리 2(T2)는 상대적으로 많이, 주기적으로 일정량을 관개한 처리 4(T4)는 상대적으

로 적은 양이 관개되어 각 처리별로 각각 총 120,750, 142,800, 95,655, 43,050g/plant의 양이 관개되었다.

Table 7은 각 관개처리별로 실험 종료시에 측정된 지상부 건물중으로, 각 처리간에 차이가 통계적으로 유의하지 않았다. 수량과 과실의 당도의 경우 포트조건에서는 DI 지표에 따른 관개가 토양수분에 의한 관개보다 우수하였으나 토양조건에서 최종 수량 및 당도는 Table 8과 같이 처리에 따라 큰 차이가 없었다. 포장재배에서 수량이 관개방법에 따라서 큰 차이가 없는 것은 지하수의 공급, 수분의 유실 등에 의하여 포트재배에서와는 달리 수분조건의 차이가 상당부분 완화되기 때문인 것으로 해석할 수 있을 것이다.

Table 6. Timing and amount of Irrigation due to different irrigation method in field culture during May to July, 1998

	Treatment			
	T1	T2	T3	T4
Irrigated days (day)	38	46	51	14
Total Irrigation amount (g/plant)	120,750	142,800	95,655	43,050
Average Irrigation Interval (day)	2.42	2.00	1.80	6.57
Average Irrigation amount at once (g/plant)	3178	3104	1876	3075

Table 7. Dry weight of tomato irrigated with different methods of irrigation timing and amount in field culture condition.

Treatment	Dry weight(g/plant)				LAI
	Leaf	Petiol	Stem	Total	
T1	54.2	31.6	33.6	119.4	8.27
T2	50.2	29.7	32.3	112.2	8.13
T3	56.3	32.9	33.9	123.1	9.35
T4	61.8	41.0	38.0	140.8	9.82
F-value	ns	ns	ns	ns	ns

ns: not significant at 5% probability level.

Table 8. Fresh fruit yield and Brix degree of tomato irrigated with different method of irrigation timing and amount in field culture condition.

Treatment	Brix(°Bx)	Yield(kg/10a)	Fruit number(/10a)
T1	5.56	4672	36440
T2	5.49	4552	38680
T3	5.63	4524	38760
T4	5.51	4516	37000
F-value	ns	ns	ns

ns: not significant at 5% probability level.

본 실험을 통하여 경직경의 변화 패턴으로부터 작물생장에 대한 정보와 함께 수분공급과 소모에 의하여 변화하는 작물의 수분상태에 대한 정보를 분리하여 낼 수 있었으며, 수분부족으로 인하여 작물이 스트레스를 받게 되면 경직경에 그 영향이 바로 나타나므로 작물에 가해지는 수분 스트레스의 정도가 얼마인가를 경직경의 변화 패턴으로서 평가할 수 있었다. 경직경 일증가량(DI)은 前日의 적산일사량과 正의 상관을 갖는다고 할 때 토양수분이 제한적인 조건에서 경직경 일증가량(DI)은 일사량에 대한 기대치보다 낮은 값을 갖게 되고, 작물이 받는 수분 스트레스가 커지게 되면 오히려 경직경이 감소하여 DI가 마이너스값을 나타내게 되므로 경직경 측정값에 근거하여 자동으로 관개제어가 가능하다. 그러나 경직경 일증가량(DI)은 개체, 환경, 시간, 센서의 감지부위 등의 외부 교란요인을 포함하고 있어 관개의 지표로 직접 사용하기 위해서는 이에 대한 적절한 처리과정이 필요할 것임을 알 수 있었다. 경직경 일증가량(DI)을 다음과 같이 표현한다면,

$$DI = DI_{exp} \times F_o \times F_t \times F_s$$

위 식에서 실제 DI값은 수분스트레스에 의한 영향(Fs)에 대하여, 이(1997b))의 회귀식으로부터 추정된 관개 판단 전날의 적산 일사량에 대한 경직경 증가의 예상

치(DI_{exp})를 이용하여 예측할 수 있으나, 그 이외의 식물 개체 또는 감지부위에 따른 변이(F_o), 생장시기별에 따른 경직경 증가량의 차이(F_t)의 영향도 관여하고 있다. 따라서 F_o 및 F_t 등의 영향을 최소화하거나 적절히 처리하여 준 상태에서 F_s가 과도하게 떨어지지 않는 시점에서 관개하도록 하여야 할 것으로 생각된다. 한편 컴퓨터 모델에 의해 주변 환경요소로부터 추정된 증산량 정보는 실측 증산량과 잘 일치하여 관개 자동화에 유용하게 활용할 수 있다고 판단되며 특히 경직경의 변화량과 같은 작물의 수분상태에 대한 직접적 정보에 근거하여 정밀한 관개를 위해서 필수적인 부분이라고 할 수 있다. 작물적 지표에 의한 관개, 즉 경직경의 변화에 의한 관개 개시기의 결정과 추정 증산량에 의한 관개량의 공급 시스템을 포트재배(closed feeding system)와 포장조건에서 시험한 결과, 포트조건에서는 토양수분에 의한 관개보다 수량과 당도에 있어서 우수하였으나 토양 조건에서는 토양수분에 근거하여 관개하거나 경직경에 의하여 관개하거나 증산량 추정모델에 의한 관개량의 공급의 효과가 유의하지 않았으며 이것은 관개수의 유출, 토양의 지하수 공급력 등이 closed feeding system과는 다른 주변 환경 조건에 기인하는 것으로 해석할 수 있다.

이상의 실험 결과에 근거하여 경직경 변화에 의한 식물체의 수분상태에 대한 정보를 양액재배와 같은 수분보유력이 낮은 배지에 대한 재배방식에 적용할 경우에는 실험에서와 같은 경직경 일증가량(DI)에 의한 관개 개시점 결정 외에 경직경의 변화패턴 분석에 의하여 식물체의 수분상태를 인지하여 관개개시에 이용하도록 할 수 있는 방법을 고려할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 작물적 지표에 근거한 관개제어의 적용에는 재배 형태, 작물에 대한 수분 스트레스의 조절성, 수자원의 효율적 관리 등도 포함하여 종합적으로 관개 관리하는 전략이 필요할 것으로 생각된다.

적 요

본 논문에서는 온실재배 토마토에서 수분 상태를 고려한 정밀한 관개를 위하여 경직경의 변화에 근거한 자동관개 시스템을 구현하고자 하였으며 이와 같은 작물적 지표에 의한 관개제어시스템을 포트재배(closed feeding system) 조건과 포장재배 조건의 재배에 적용하여 토마토의 수량과 과실의 품질에 대하여 그 적합도를 평가하였다. 작물적 지표에 의한 관개 자동화를 위하여 경직경 측정 센서를 이용하여 측정된 경직경 일증가량(DI)를 관개 개시점의 결정에 이용하고, 동시에 이때의 관개량을 결정하기 위하여 토마토 증산모델을 적용한 마이크로 컴퓨터 자동관개 시스템을 구현하고 그 성능을 평가하였는데, 이 자동 관개 시스템을 이용하여 관개 처리한 결과 포트재배에서는 토양수분에 의한 관개방식보다 수량 및 과실의 당도가 증가하였으나 포장조건에서는 관개방법간에 큰 차이가 없었다. 따라서 경직경 증가에 근거한 관개 개시점을 판단하고 관개량을 결정하는 증산모델을 사용하는 컴퓨터 시스템은 특히 closed feeding system에서 유용하며 토양조건에서는 토

양의 상태, 작물의 반응 등을 고려하여 적용하여야 할 것으로 판단되었다.

인 용 문 헌

1. 김철수, 김진현, 장성원. 1989. 마이크로 컴퓨터를 이용한 시설원예작물 재배의 관개자동화에 관한 연구. 한국농업기계학회지 14(2) : 128-136.
2. 신재훈. 1999. 온실재배 토마토의 경직경 변화와 수분 스트레스와의 관계 및 이를 이용한 관개 자동화 연구. 서울대학교 대학원 석사논문.
3. 이변우. 1997a. 온실재배 토마토의 증산 모델 개발 및 검증. 생물생산시설환경 6(3) : 205-215.
4. 이변우. 1997b. 온실재배 토마토의 경직경 변화에 의한 관개시기 진단. 생물생산시설환경 6(4) : 250-257.
5. 이변우. 1997c. 시설 토마토 재배 최적 환경 구현을 위한 자동제어논리 개발. 농림부 현장애로기술개발사업 최종보고서. p. 325.
6. Lee, B. W. and J. H. Shin. 1998. Optimal irrigation management system of greenhouse tomato based on stem diameter and transpiration monitoring. Agricultural Information Technology in Asia and Oceania 1998 : 87-90.
7. Moriya, H., K. Iwao and H. Kageyama. 1992. Studies on non-destructive and continuous measurement of water contents and applications to irrigation in crop culture. Acta Horticulturae 304 : 345-351.
8. Sato, N. and K. Hasegawa. 1995. A computer controlled irrigation system for muskmelon using stem diameter sensor. Acta Horticulturae 399 : 161-165.