

작물생장모델을 이용한 상추의 온실 최적설정온도 탐색 알고리즘의 개발

Development of an Algorithm for Searching Optimal Temperature Setpoint for Lettuce in Greenhouse Using Crop Growth Model

류 관 희*	김 기 영*	김 희 구*	채 희 연*
정회원	정회원		
K. H. Ryu	G. Y. Kim	H. G. Kim	H. Y. Chae

ABSTRACT

This study was conducted to develop a searching algorithm for optimal daily temperature setpoint of greenhouse. An algorithm using crop growth and energy models was developed to determine optimum crop growth environment.

The results of this study were as follows:

1. Mathematical models for crop growth and energy consumption were derived to define optimal daily temperature setpoint.
2. Optimum temperature setpoint, which could maximize performance criterion, was determined by using Pontryagin maximum principle.
3. Dynamic control of daily temperature using the developed algorithm showed higher performance criterion than static control with fixed temperature setpoint. Performance criteria for dynamic control models were with simulated periodic weather data and with real weather data, increased by 48% and 60%, respectively.

주요용어(Key Words): 성장모델(Crop growth model), 에너지투입모델(Energy input model), 성능지수 (Performance criterion), Pontryagin의 최대 원리(Pontryagin's maximum principle), 주간 설정온도(Daily temperature setpoint)

1. 서 론

국민소득 수준 향상에 따른 고품질 농산물에 대한 수요 증가와 높은 수익성으로 시설원에 면적은 연평균 10.8%씩 증가하여 96년 현재 47,406ha에 이르고 있다. 시설원에 농가는 수익성 증대를 위해 경영 규모를 확대시키고 생산성 향상과 생력화를 위한 시설

의 자동화를 급속히 진행시키고 있다. 자동화 설비를 갖춘 온실은 유지비용이 높기 때문에 온실 시설의 최적 사용이 요구된다. 온실 환경제어는 주간 일사량 증가에 따른 과열현상과 야간 기온 하강에 의한 작물 피해 등을 최소화하는 초기 제어형태에서 에너지 소비를 최소화하면서 적절한 작물생육환경을 조성할 수 있는 최적제어로 변화하고 있다. 최적

* 서울대학교 생물자원공학부 농업기계전공

제어를 위해서는 외부 기후를 고려하여 작물 생육환경을 조절함으로써 최적 생육환경, 적절한 수확시기 그리고 최고의 품질을 얻어낼 수 있는 환경제어 소프트웨어의 개발이 요구된다.

생장 모델은 온실환경과 작물간에 일어나는 복잡한 상호작용에 대한 이해를 돕는다. 또한, 최대 이윤을 얻을 수 있는 온실 환경 제어 방법, 환경제어설비의 관리, 그리고 재배작물의 선택에 도움을 준다. 1980년대까지는 주로 온실환경만을 시뮬레이션 하는 연구들(Seginer, 1980; Takakura, 1971)이 수행되어졌으나 1990년대에 들어서 작물의 생리학적인 모델에 대하여 많은 연구들이 이루어졌고(Jones, 1991; van Henten, 1994), 최근에는 최대이윤을 위한 제어 방법을 결정하기 위하여 온실 환경모델과 성장모델을 결합한 연구들이 많이 수행되고 있다.

Seigner(1991)는 최적 제어이론을 바탕으로 작물재배시스템의 설정온도를 최적화하였고 고정 설정온도방식과 비교하여 난방비 절감효과가 있음을 보고하였다. Hansen(1996)은 환경제어의 최적화로 동절기에 건중량의 변화없이 에너지 소비를 27% 감소시켰고, 동절기가 아닌 경우 수확량 증가와 더불어 17~23%까지 에너지 소비 절감효과를 거두었다.

온실 환경에서 실내 온도제어를 위한 설정값을 결정하는 것은 적절한 작물의 생육환경 조성 과 난방비용 절감 측면에서 중요하다. 본 연구의 목적은 재배시스템을 수학적으로 모델링하고 최적 제어이론을 이용하여 재배기간의 주간 설정온도를 최적화하는 알고리즘을 개발하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 작물 성장 모델

작물 생산을 위한 온실환경을 제어할 경우 제어 대상인 작물의 환경 변화에 대한 반응을 예측할 수 있어야 목적에 맞는 제어를 할 수 있다. 환경 변화에 대한 작물의 반응을 예측하기 위하여 작물 성장 모델을 이용하였다. 또한, 작물 성장 모델에서 이용된 매개변수 및 상수값들은 다른 연구논문(Seigner, 1991)에

서 사용된 상추의 데이터를 이용하였다.

작물성장 시뮬레이션은 잎군락에서 일어나는 순광합성량을 계산하는 접근방법을 사용하였다. 작물이 어릴 때는 일사량에 따라 성장량이 결정되므로 잎의 발달이 중요하고 작물이 성장하게 되면 잎군락이 충분히 발달하게 되므로 그 필요성이 줄어든다. 따라서 건중량과 더불어 잎 발달정도를 나타내는 엽면적비를 고려하여 작물 성장을 모델링하였다.

(1) 건중량 변화 모델

작물 성장 모델링의 기본적인 접근은 잎군락의 순광합성량을 계산하는 것이다. 작물의 순광합성량은 총광합성량과 호흡량의 차이로 정량화된다. 일반적으로 순광합성율은 성장단계, 기상조건 그리고 제어장치 작동 등을 입력으로 하여 식(1)과 같은 미분방정식으로 표현된다. (Seigner, 1991)

$$\frac{dW}{dt} = G\{P, T\}M\{L\} - R(T)N\{W\} \dots\dots\dots (1)$$

W = mass of dry matter per soil area
 $kg(d.m.) / m^2 (soil)$

G = closed canopy gross photosynthesis rate,
 $kg(d.m.) / m^2 (soil)sec$

M = gross photosynthesis correction for partial canopy

R = respiration rate, $kg(d.m.) / kg(d.m.)sec$

N = effective crop mass for respiration,
 $kg(d.m.) / m^2 (soil)$

L = leaf area index, $m^2 (leaf) / m^2 (soil)$

P = PAR(photosynthetically active radiation) flux, $W(PAR) / m^2 (soil)$

T = temperature, K

식(1)의 우변 첫째 항은 총광합성율, 둘째 항은 호흡에 의한 건중량 변동률을 의미한다. 호흡에 의한 건중량 변동률은 생장호흡의 영향으로 손실이 발생하므로 보정항을 갖는다. 연구를 통해 구명된 작물별 최적온도를 고려하여 다음과 같은 2차식으로 온도에 대한 작물의 총광합성을 수식화하였다.

(Seigner, 1991)

$$B\{T\} = B_R + \alpha(T - T_R) + \beta(T - T_R)^2 \dots\dots\dots (2)$$

B = gross photosynthesis response to temperature, $kg(d.m.) / m^2(soil) \cdot sec$

T_R = reference temperature, 25°C

B_R = $1.43 \times 10^{-6} kg(d.m.) / m^2(soil) \cdot sec$

α = $-5.46 \times 10^{-9} kg(d.m.) / m^2(soil) \cdot K \cdot sec$

β = $-2.99 \times 10^{-9} kg(d.m.) / m^2(soil) \cdot K^2 \cdot sec$

총광합성은 수관에 조사되는 광합성 유효복사율(PAR)과 온실 내부 온도의 함수로 표현되며 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. (Seigner, 1991)

$$G\{P, T\} = \frac{\epsilon PB\{T\}}{\epsilon P + B\{T\}} \dots\dots\dots (3)$$

G = closed canopy gross photosynthesis rate, $kg(d.m.) / m^2(soil)sec$

P = PAR(photosynthetically active radiation) flux, $W(PAR) / m^2(soil)$

T = temperature, K

B = gross photosynthesis response to temperature, $kg(d.m.) / m^2(soil) \cdot sec$

ϵ = photosynthetic efficiency, $5 \times 10^{-9} kg(d.m.) / J(PAR)$

총광합성율은 잎군락의 발달정도에 영향을 받게 되므로 엽면적지수를 고려한 식(4)에 의해 보정된다. (Seigner, 1991)

$$M\{L\} = 1 - e^{-aL} \dots\dots\dots (4)$$

M = gross photosynthesis correction for partial canopy

L = leaf area index, $m^2(leaf) / m^2(soil)$

a = coefficient, $0.8m^2(soil) / m^2(leaf)$

작물의 호흡활동에 의해 광합성 산물 중 일부가 손실되는데 온도에 따른 호흡량은 식(5)와 같다.

(Seigner, 1991)

$$R\{T\} = R_R e^{b(T - T_R)} \dots\dots\dots (5)$$

R = respiration rate (corrected as G), $kg(d.m.) / kg(d.m.)sec$

T_R = reference temperature, 298.16K

T = temperature, K

R_R = coefficient, $0.427 \times 10^{-6} / sec$

b = coefficient, 0.0693

호흡량은 건중량에 비례하여 증가하므로 식(6)에 의해 보정된다. (Seigner, 1991)

$$N\{W\} = W \dots\dots\dots (6)$$

N = effective crop mass for respiration, $kg(d.m.) / m^2(soil)$

W = mass of dry matter per soil area $kg(d.m.) / m^2(soil)$

(2) 엽면적 변화 모델

높은 온도와 낮은 일사조건에서 작물생육은 잎군락의 생장이 활발하여 엽면적비가 높아지는 것으로 보고되고 있다. 작물이 어릴 때는 광합수량에 따라 성장량이 결정되므로 잎의 발달이 중요하고 작물이 성장하게 되면 잎군락이 충분히 발달하게 되므로 그 필요성이 줄어들어간다. 잎군락의 발달은 작물의 광합성활동으로 생성된 광합성물 중 잎군락으로 전달되는 광합성물의 양에 의해 결정된다. 이 전달률이 일정하다면 잎군락 발달은 다음과 같이 표현된다. (Seigner, 1991)

$$W_s = mW \dots\dots\dots (7)$$

W_s = mass of dry matter per soil area in shoot, $kg(d.m.) / m^2(soil)$

m = fraction shoot to total dry matter, $kg(d.m.) / kg(d.m.)$

엽면적비는 온실 내부 온도와 일사량 조건에서 광합성물의 전달량에 의해 결정되고 근사식은 식(9)와

같다. (Seigner, 1991)

$$dL/dW_s = A\{T, P\} \dots\dots\dots (8)$$

$$A\{T, P\} = A_R + \gamma(T - T_R) - \delta(P - P_R) \dots\dots (9)$$

$$A_R = 74m^2(leaf)/kg(d.m)$$

$$\delta = 0.26m^2(leaf)m^2(soil)/kg(d.m) \cdot W(PAR)$$

$$\gamma = 2.9m^2(leaf)/kg(d.m) \cdot K$$

$$T_R = \text{reference temperature, } 278.16K$$

$$P_R = 127W(PAR)/m^2(soil)$$

식(7), 식(8), 그리고 식(9)를 이용하여 엽면적비 증가에 대한 모델식을 얻을 수 있다. (Seigner, 1991)

$$\frac{dL}{dt} = mA\{T, R\}(G\{P, T\}M)\{L - R\{T\}N\{W\}\} \dots\dots\dots (10)$$

나. 에너지 투입 모델

온실 내부 일사량은 직달광의 상면투과율을 70%로 하여 식(11)을 통해 계산하였다. (Seigner, 1991)

$$P_i = \tau P_o \dots\dots\dots (11)$$

P = PAR (photosynthetically active radiation) flux, $W(PAR)/m^2(soil)$

τ = transmissivity of greenhouse to solar radiation, 0.7

i = outer condition

o = inner condition

설정온도를 유지하기 위해서 필요한 온실 난방 부하량은 식(12)를 이용하여 시간단위로 계산하였다. 계산된 난방 부하량이 0보다 작으면 난방을 하지 않고 온실 내부 잉여 열량은 환기를 통해 배출시키는 것으로 하였다. (Seigner, 1991)

$$S_o + F - (U + Q)(T_i - T_o) = 0 \dots\dots\dots (12)$$

S = global solar radiation flux, $W(solar)/m^2(soil)$

F = heat flux from heater, $W(heat)/m^2(soil)$

U = convective-radiative heat transfer coefficient, $7W(heat)/m^2(soil)K$

Q = transfer coefficient due to ventilation, $W(heat)/m^2(soil)K$

q = heating efficiency of global solar radiation, 0.4

투과광 중 광합성유효복사율은 식(13)으로부터 계산하였다. (Seigner, 1991)

$$\frac{P_i}{S_i} = \frac{P_o}{S_o} = \zeta \dots\dots\dots (13)$$

P = PAR(photosynthetically active radiation) flux, $W(PAR)/m^2(soil)$

S = global solar radiation flux, $W(solar)/m^2(soil)$

ζ = ratio of PAR to global solar radiation, 0.5

위 모델에서 재배자가 변화시킬 수 있는 제어량은 난방량과 환기량 두 가지이다.

다. Pontryagin의 최대 원리

온실내 최적 설정온도를 찾기 위해 Pontryagin의 최대 원리를 이용하였다. 식(14)는 작물 성장을 시물레이션하는 모델식이고 식(15)는 성능지수를 의미한다. 성능지수를 최대화하는 일련의 제어량을 찾는 최적화 문제는 Pontryagin의 최대 원리를 적용하여 식(16)에서처럼 일별 제한범위에서 Hamiltonian 함수를 최대화하는 제어량 결정 문제로 변환된다.

$$\frac{dx}{dt} = f\{x, u, e\} \dots\dots\dots (14)$$

$$J = h[x\{t_f\}, e\{t_f\}] + \int_0^{t_f} g[x\{t\}, u\{t\}, e\{t\}]dt \dots (15)$$

t_f : 수확기

x : 작물의 생육상태

e : 시장가격

$u(t)$: 환경제어에 의한 소용경비

$$H(x, u, e, p) = g(x, u, e) + p\{t\} f(x, u, e) \dots (16)$$

비용함수 $p(t)$ 가 시간에 따라 감소한다면 이것에 상응하는 상태변수의 중요성이 감소하고 있다는 것을 의미한다. 식(16)의 $g(x, u, e)$ 는 현시점에서 순이익을 나타내고, $p\{t\} f(x, u, e)$ 는 제어의 결과로 다음에 나타날 잠재적 이익을 나타낸다. 비용함수는 식(17)을 만족하여야 한다.

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} \dots (17)$$

Pontryagin의 최대 원리 특징은 비용함수 개념이다. 비용함수는 재배기간중 일별 제어량 결정에 영향을 주는 것이다. 비용함수 초기값은 성능지수를 최대로 만드는 값으로 식(18)을 만족하여야 한다.

$$\frac{dJ}{dp(0)} = 0 \dots (18)$$

라. 성능지수

재배시스템 제어 최적화의 유용한 성능지수는 이윤이다. 재배기간동안 성능지수를 최대로 하는 제어량을 결정해야 한다. 제어변수는 난방량과 환기량 두 가지이다. 환기는 내·외기 온도와 정압의 차이에 의해 자연 환기되는 것으로 가정하였고 온실 유지비에서 천창과 측창 개폐 등 환기를 위해 사용되는 전력소모량은 난방비에 비하여 상대적으로 작으므로 난방비용만을 온실관리 비용으로 산정하였다. 구성된 성능지수는 식(19)와 같다. (Seigner, 1991)

$$J = k(t_f)W_s\{t_f\} - vt_f - \int_0^{t_f} cF\{t\}dt \dots (19)$$

$W_s(t_f)$: 수확기의 총수확량

$k(t_f)$: 수확기의 시장가격

v : 시설 고정비용 단가

c : 난방비용 단가

$F(t)$: 난방 요구량

t_f : 수확시기

마. 실제 온실 제어에의 응용

Pontryagin의 최대 원리를 이용한 최적화의 방법은 초기 비용함수의 값을 결정하기 위해서는 작물을 정식한 날부터 수확하는 날 까지의 기상자료가 필요하다. 일반적으로 상추 재배기간이 한 달 남짓 소요되는 점을 감안한다면 장기적인 기상예측이 어렵기 때문에 실제 작물 재배시스템에서 초기 비용함수값을 결정할 수 없다. 따라서 이 알고리즘을 온실 환경 제어시스템의 설정값 결정에 이용하기 위해서는 초기 비용함수값 결정에 대한 보완이 필요하다. 최근 30년간 평균기상자료를 이용하면 급격한 이상고온·저온에 대한 고려는 어렵겠지만 계절별 혹은 월별 작물 재배기간 동안의 대체적인 기후변화에 대해서는 최적화에 반영할 수 있다. 본 연구에서는 초기값 결정에 다소간에 오차가 있더라도 평년기상자료를 이용하여 초기 비용변수의 값을 결정하였고 다음날 24시간에 대한 기상 정보가 제공되면 작물 재배시스템의 일별 주간 설정온도의 최적화를 시도하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 가상 기상자료를 이용한 시뮬레이션

개발된 알고리즘을 이용하여 건중량이 목표값의 허용오차 $\pm 1\%$ 범위내에 이를 때까지 설정온도를 최적화하였다. 수확기까지의 일련의 최적 설정온도가 적합한지를 판단하기 위하여 주간 온도를 10℃, 15℃ 그리고 20℃로 설정하였을 경우와 재배일수 그리고 성능지수를 비교하였다. 외부기상 중 온도는 최고 5℃, 최저 -5℃의 열중 변화를 보이는 주기함수로 일사량은 17시부터 다음날 7시까지는 0이고 12시에 최고 400W/m²의 변화를 보이는 주기함수로 입력하였다. 야간 설정온도는 건중량 감소를 가져오는 호흡을 최소화하기 위해 5℃로 설정하고 주간설정온도만을 최적화하였다.

최적화를 통해 얻어진 설정온도에 따라 온실환경을 제어한 결과 작물의 건중량과 엽면적비의 증가는 그림 1과 같다. 시뮬레이션 결과 상추의 건중량은

정식 후 30일이 경과한 후 목표 건중량 $0.302\text{kg}(d.m) / \text{m}^2(\text{soil})$ 의 $\pm 1\%$ 허용 오차범위에 도달하였다.

그림 2는 재배기간동안 기상 기상자료를 입력하여 성능지수를 최대화하는 비용 함수의 초기값을 결정 한 다음 일별 온실 주간온도를 최적화하는 비용변수들의 변화를 보여주고 있다. 재배 초기에는 설정 온도를 높여서 잎근락의 생육을 활발하게 하여 일사량 흡수를 높이고 잎근락이 충분히 발달하게 되면 잎근락 적온보다 낮은 광합성 적온으로 설정온도

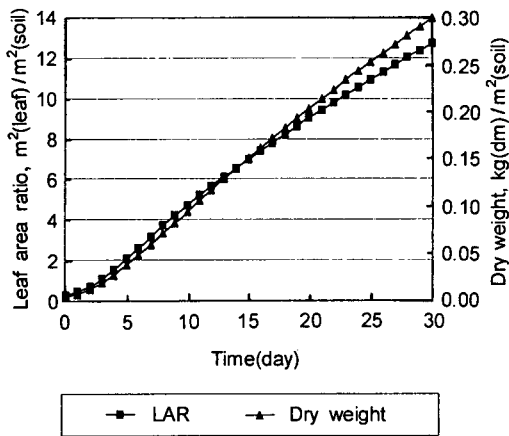


Fig. 1 Evolution of total dry weight and leaf area ratio for the two state-variables model under optimal control.

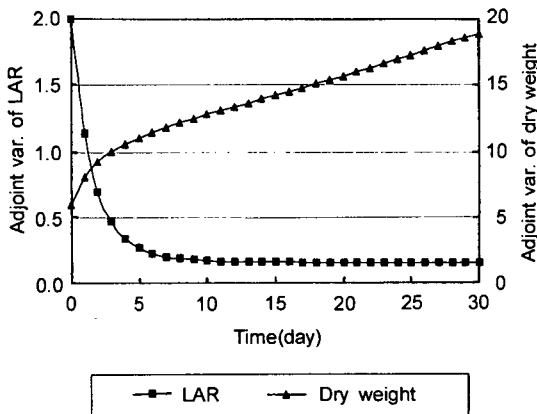


Fig. 2 The trajectories of the two adjoint variables for the two state-variables model under optimal control.

를 유지하는 것이 좋은 재배방식이다. 엽면적비의 비용함수가 초기에는 높은 값을 가지다가 0에 접근하는 것은 이런 작물 생리를 잘 반영하고 있다. 건중량의 비용함수는 엽면적비와는 반대의 양상을 보이고 있다.

그림 3은 주기적인 외부 온도와 일사 조건에서 작물이 목표하는 건중량에 도달할 때까지 주간 설정온도를 최적화시킨 결과이다. 어린 작물의 경우 일사량에 따라 성장량이 결정되므로 온실내부 설정온도를 높여서 잎의 발달을 피하여야 한다. 광합성 적온은 잎근락의 발육 적온보다 낮으므로 최적온도는 생육단계가 올라갈수록 감소하는 경향을 보이게 된다. 그림 3의 설정온도는 이러한 작물 특성과 잘 부합한다.

최적화의 타당성을 검증하기 위해 온실 주간 설정 온도를 생육적온인 15°C , 20°C 및 저온관리를 고려한 10°C 로 일정하게 설정한 경우와 성능지수 및 재배일수를 비교하였다. 그 결과는 표 1과 같다.

야간 설정온도는 5°C 로 설정하고 주간 설정온도 방식을 달리하여 작물생장을 시뮬레이션하였다. 개발된 알고리즘을 적용하여 최적화한 경우 설정온도를 상추 생육적온인 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ 에서 성능지수가 가장 높게 나타난 15°C 로 고정하였을 때와 비교하여 214% 성능지수 상승효과를 얻었으며 재배일수도 단축되었으므로 개발된 최적화 방법이 효과적이라고 할 수 있다.

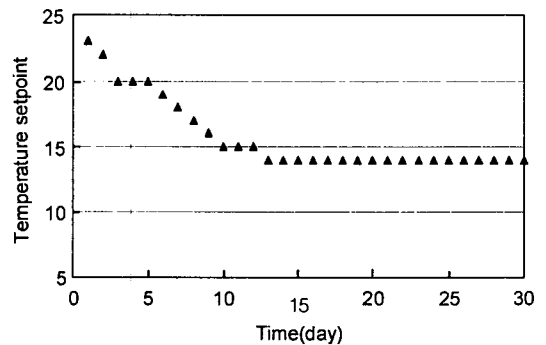


Fig. 3 Optimal temperature-setpoint trajectories for the two state-variable model under periodic weather.

Table 1 Summary of crop growth simulation for different temperature setpoints with a set of virtual weather data

Temperature setpoint(°C)	Growing period (day)	Performance criterion (won)
10	37.10	-203
15	32.09	65
20	31.10	-109
Optimized	30.15	204

Table 2 Summary of crop growth simulation for different temperature setpoints with a set of actual weather data

Temperature setpoint(°C)	Growing period (day)	Performance criterion (won)
10	74.11	-1,429
15	49.12	411
20	55.11	-435
Optimized	40.12	984

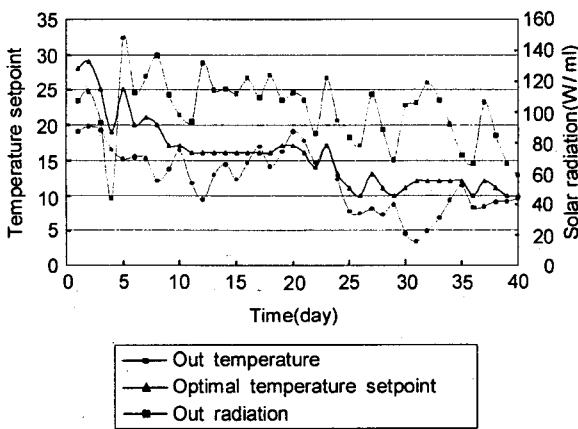


Fig. 4 Optimal temperature-setpoints trajectory under a real climate : mean temperature and mean solar radiation.

나. 실제 기상자료를 이용한 시뮬레이션

일별 기상조건의 경향이 일정한 경우 온실 주간 설정 온도를 최적화하는 시뮬레이션 이외에 외부온도와 일사량조건이 변화하는 실제 기상자료를 이용하여 설정온도를 최적화하였다.

입력 기상자료는 1997년 10월 1일부터의 수원지역 기상자료를 이용하였다. 그림 4는 실제 기상자료를 입력으로 하여 얻어진 최적 설정온도를 나타낸 것이다. 일사량이 좋은 날의 경우 설정온도가 높아지는 경향을 볼 수 있다. 진동이 심한 실제 기상에 대한 주간설정온도 최적화를 평가하기 위해 고정온도 설정방식과 재배일수, 성능지수를 비교한 결과는

표 2와 같다. 일사량이 충분하지 않기 때문에 모든 설정방식에서 작물생육은 더디게 나타났다. 설정온도를 최적화시킨 결과 15°C 고정 설정온도방식과 비교하여 139.42%의 성능지수 상승효과가 있었고 재배일수도 단축되었다.

다. 재배시스템에 대한 적용성

온실의 주간 설정온도 최적화에 Pontryagin의 최대 원리를 적용하였고 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증해 본 결과 성능지수가 고정온도 설정방식 등의 정적 제어와 비교하여 높게 나타났고 환경변화와 작물생육상태에 따라 설정온도가 변화하였다. 그러나 Hamiltonian 함수를 최대화하는 제어량을 결정하는데 비용함수의 초기값이 필요하고 이 초기값 결정에는 목표 건중량에 이르는 재배기간까지의 기상자료가 필요하다. 온실 제어시스템의 설정온도를 결정하는데 개발된 알고리즘을 이용하고자 한다면 비용함수 초기값 계산에 대한 보완이 필요하다.

실제 작물 재배시스템의 적용을 위해 본 연구에서는 비용함수 초기값 결정에 평년기상자료를 이용하였다. 외부온도 입력은 평년기상자료의 일별 최고·최저온도를 크기로 하는 주기함수를 사용하였고 일사량은 평년기상자료가 없어 1995년부터 1997년까지의 평균일사량을 입력자료로 사용하였다. 평년기상자료와 1997년 10월 실측자료 두 가지를 이용하여 비용변수 초기값을 결정하여 보았고 그에 따른 설정온도 최적화 결과는 그림 5와 같다.

초기 비용변수 결정 방법에 따른 설정온도 최적화

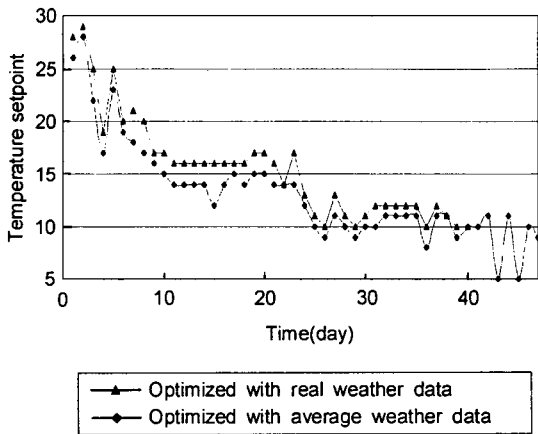


Fig. 5 Optimal daytime temperature setpoint trajectories by methods of determining the initial values of costate function.

Table 3 Summary of crop growth simulation according to methods of determining the initial costate variables

Input weather data	Growing period (day)	Performance criterion (won)
Constant (15°C)	49.12	411
Average weather	47.11	689
Real weather	40.12	984

를 비교하기 위하여 성능지수와 재배일수를 표 3에 정리하였다. 실제 기상자료를 입력하여 비용함수 초기값을 결정하는 것이 평년자료를 이용한 경우보다 높은 성능지수와 짧은 재배일수를 보였다. 하지만 표 3에 나타난 결과와 같이 평년자료를 이용한 최적화가 고정온도 설정방식 중 성능지수가 가장 높은 15°C의 고정온도 설정방식과 비교하여 68%의 성능지수 향상이 있음을 보았을 때 작물 재배시스템의 설정값을 결정하는 중간단계 제어논리 추론부에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 온실 환경제어시스템에 최적 주간 설정온도를 제시하는 알고리즘을 개발하였으며 그

결과는 다음과 같다.

1. 최적제어이론을 적용하기 위하여 작물 성장과 에너지 투입을 수학적으로 모델링 하였다.
2. Pontryagin의 최대 원리를 적용하여 성능지수를 최대화하도록 온실 주간설정온도를 최적화하였다.
3. 시뮬레이션 수행 결과 개발된 알고리즘에 의한 주간 설정온도의 동적제어는 고정 설정 온도방식에 비하여 높은 성능지수를 보였다. 설정온도를 상추 생육적온 15~20°C에서 성능지수가 가장 높게 나타난 15°C로 고정하였을 때 비교하여 동적제어는 가상 기상자료의 경우 214%, 1997년 10월부터의 실제 기상자료를 이용한 경우 139%의 성능지수 상승효과를 얻었다.
4. 평년자료를 이용하여 비용변수 초기값 결정하였을 때 설정온도를 15°C로 유지시킨 고정 설정온도 방식과 비교하여 68%의 성능지수 상승효과를 얻었다. 이들 결과로부터 개발된 알고리즘은 실제 온실 환경 제어시스템의 설정온도를 제시하는데 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Seginer I., G. Shina, L. D. Albright and L. S. Marsh. 1991. Optimal temperature setpoints for greenhouse lettuce. *Journal of Agricultural Engineering Research* 49:209-226.
2. Hansen, J. M., N. Ehler and P. Kalsep. 1996. Decreasing the environmental load by a photosynthetic based system for greenhouse climate control. *Acta Horticulturae* 440:105-110.
3. Jones J. W., E. Dayan, L. H. Allen, H. Y. Van Keulen and H. Challa. 1991. A dynamic tomato growth and yield model(TOMGRO). *Trans. ASAE* 34 (2):663-672.
4. Seginer Ido, Louis and D. Albright. 1980. Rational Operation of Greenhouse Thermal- Curtains. *Trans. ASAE* 23(4):1240-1245.
5. Takakura, T., K. A. Jordan and L. L. Boyd. 1971. Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *Trans. ASAE* 14(5):964-971.
6. VanHenten, E. J. 1994. Validation of dynamic lettuce growth model for greenhouse climate control. *Agricultural Systems* 45:55-72.