

## 광합성효율 모델을 이용한 밀폐형 식물 생산시스템의 재배환경 최적화

김기성\* · 김문기<sup>1</sup> · 남상운<sup>2</sup>

University of Arizona, <sup>1</sup>서울대학교 농공학과, <sup>2</sup>충남대학교 농공학과

### Optimization of Growth Environment in the Enclosed Plant Production System Using Photosynthesis Efficiency Model

Keesung Kim\*, Moon Ki Kim<sup>1</sup>, and Sang Woon Nam<sup>2</sup>

Dept. of Agriculture & Biosystem Eng., University of Arizona, Tucson, AZ85721, USA

<sup>1</sup>Dept. of Agricultural Eng., Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Agricultural Eng., Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**Abstract.** This study was aimed to assess the effects of microclimate factors on lettuce chlorophyll fluorescent responses and to develop an environment control system for plant growth by adopting a simple genetic algorithm. The photosynthetic responses measurements were repeated by changing one factor among six climatic factors at a time. The maximum  $F_v'/F_m'$  resulted when the ambient temperature was 21°C, CO<sub>2</sub> concentration range of 1,200 to 1,400 ppm, relative humidity of 68%, air current speed of 1.4 m·s<sup>-1</sup>, and the temperature of nutrient solution of 20°C. In PPF greater than 140 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,  $F_v'/F_m'$  values were decreased. To estimate the effects of combined microclimate factors on plant growth, a photosynthesis efficiency model was developed using principle component analysis for six microclimate factors. Predicted  $F_v'/F_m'$  values showed a good agreement to measured ones with an average error of 2.5%. In this study, a simple genetic algorithm was applied to the photosynthesis efficiency model for optimal environmental condition for lettuce growth. Air emperature of 22°C, root zone temperature of 19°C, CO<sub>2</sub> concentration of 1,400 ppm, air current speed of 1.0 m·s<sup>-1</sup>, PPF of 430 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, and relative humidity of 65% were obtained. It is feasible to control plant environment optimally in response to microclimate changes by using photosynthesis efficiency model combined with genetic algorithm.

**Key words :** chlorophyll fluorescence, JAVA, photosynthesis efficiency model, Principle component analysis, simple genetic algorithm

\*Corresponding author

## 서 언

식물공장과 밀폐생태계 생명유지시스템과 같이 밀폐도가 높은 식물생산 시스템은 근접조명으로 인하여 기류속도가 낮아 미기상요소의 분포가 불균일하게 나타나기 쉬워 미기상 변화에 따른 식물생육의 반응에 관련된 연구가 필요하다(Kim과 Kozai, 1996). 미기상 변화에 따른 식물 생체 정보의 지표로는 건물중, 생체중, 엽면적, 줄기직경, 광합성 등이 사용되고 있으나 이러한 방법들은 식물에 심각한 손상을 주거나 고가의 장비가 필요하며, 분석방법이 어렵고 환경변화에 대한 반응이 느리다.

엽록소 형광은 다양한 미기상변화에 대한 식물의 광합성 기구의 반응을 나타내는 척도 중의 하나이다(Schreiber 등, 1998). 엽록소형광분석법은 식물의 광합성을 공간적, 시간적으로 해석 할 수 있으며, 정량적이고 비파괴적인 방법으로(Balachandran 등, 1994) 환경제어를 위한 입력변수로 충분히 사용가능하다(Willits와 Peet, 1999). 식물은 정상적인 생리상태에서는 광합성색소에 의해 흡수한 광의 대부분을 광합성에 이용하며, 극히 소량의 에너지는 열이나 엽록소형광으로 방출한다. 대조적으로 스트레스 환경에서는 광합성에 이용되는 빛에너지가 감소하고 엽록소형광이 증가하게 되어 광합성의 수행과 엽록소형광의 방출은 서로 역비례

한다. 그러므로 엽록소형광 분석을 통하여 광합성과 전자전달 반응을 측정할 수 있다(Lichtenthaler, 1992; Govindjee, 1995). 엽록소형광 측정법은 정량적이고 비파괴적으로 측정할 수 있는 방법으로 다양한 환경조건에서 광합성 해석이 가능하게 되었다(Haitz와 Lichtenthaler, 1988).

본 연구에서는 밀폐형 식물 생산시스템에서 미기상 변화(기온, 광합성 유효 광량지속, 상대습도, CO<sub>2</sub>, 공기유동, 배양액온도)에 따른 식물의 생체 정보를 이용한 최적 환경제어를 위하여 엽록소형광분석법을 이용하여 광합성효율 모델(photosynthesis efficiency model, PEM)을 개발하였다. 또한, 유전알고리즘을 이용하여 재배환경 최적화 프로그램을 개발하고 적용성을 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 밀폐형 식물 생산시스템의 제원

미기상 변화와 식물의 생체변화를 정량화하기 위하여 미기상 조절이 가능한 밀폐형 식물 생산시설 내부에 박막수경 재배시스템을 설치하고 적축면상추(*lactuca sativa* L.)를 재배하였다(Fig. 1). 광원으로 형광램프 12개, 고압나트륨램프 4개, 고압수은램프 4개를 사용하였다.

PPF는 광질을 일정하게 하고 광 강도만을 조절하기 위하여 베드의 높이를 이동하여 조절하였다. 배양액은 아마자키액을 기준으로 조성하였으며 pH는  $6.5 \pm 0.5$ , EC는  $1.2 \pm 0.05 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 로 조절하여 공급하였고 배양액이 식물에 미치는 영향을 방지하기 위하여 순환

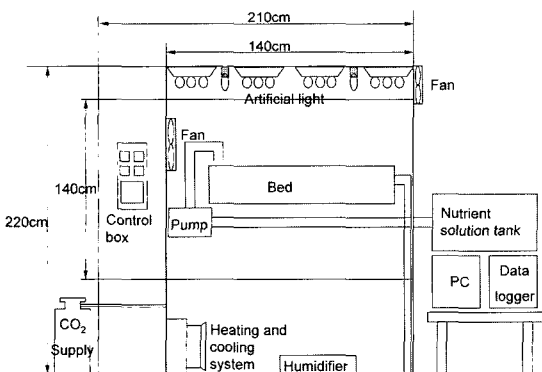


Fig. 1. Front view of the experimental apparatus.

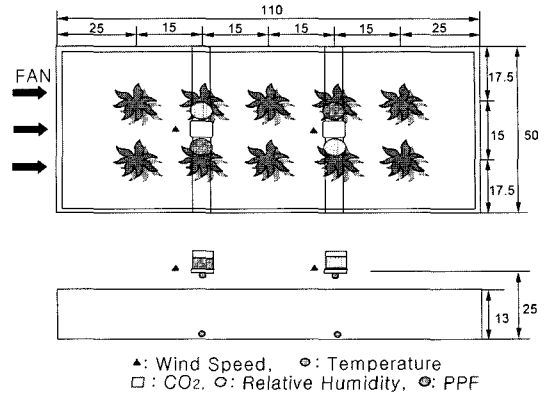


Fig. 2. Location of measuring sensors (up: plan view, down: front view, unit : cm).

시키지 않고 8시간 마다 교체하였다. 배양액의 온도는 베드 내부에 열선과 냉수배관을 설치하고 on-off 제어 하였다.

### 2. 밀폐형 식물생산시스템내의 환경계측

밀폐형 식물 생산시스템 내부의 미기상을 계측하기 위하여 Fig. 2와 같이 베드에 센서를 설치하여 계측하였으며 사용된 센서는 Table 1과 같다. 미기상 계측을 위한 센서는 PC에 연결된 데이터 수집 장치(DC100, YOKOGAWA)와 연결하여 5분 간격으로 자동 저장하였으며 PC를 통하여 내부환경을 모니터링 하였다.

### 3. 엽록소형광 분석법

식물이 광합성을 할 수 있을 정도의 일정한 강도를 갖는 연속광을 조사하면 광합성과 열의 방출이 활성화 되면서 엽록소형광은 감소하여 정상상태인 F<sub>0</sub>에 도달 하게 된다. 암적응 된 잎에 측정광을 조사한 후 암적응 최소형광 F<sub>0</sub>를 측정하고, 그 상태에서 다시 포화광 (saturation light)을 조사하면 암적응 최대형광 F<sub>m</sub>를 측정 할 수 있다. 광합성을 수행중인 상태에서 다시 포화 광을 조사하면 암적응 후에 측정된 F<sub>m</sub> 보다 작은 값을 갖는 광적응 최대형광 F<sub>m'</sub>을 측정할 수 있다. F<sub>m'</sub>에 도달한 후 정상상태(steady state)인 F<sub>t</sub>가 된다. 연속 광을 끄게 되면 형광이 F<sub>0</sub> 보다 더 작아 지게 되는데 이때의 형광을 광적응 최소형광 F<sub>0'</sub>이라 하고, F<sub>0</sub> 값보다 작은 값을 가질 경우 F<sub>0</sub> 소멸이라 한다. F<sub>m</sub>과 F<sub>t</sub>의 차이는 광화학소멸을 의미하며 F<sub>v</sub>로 나타낸다. 즉, F<sub>v</sub>' = F<sub>m'</sub> - F<sub>t</sub>의 관계를 가진다.

**Table 1.** Specification of measurement sensors

Measurement item	Model	Range	Sensitivity	Manufacture
Temperature	T-type thermocouple	0–350°C	±0.5°C	Hanstech
Relative humidity	H08-032-08	0–95%	±5%	Onset Computer Corp.
CO <sub>2</sub>	GMW-22	0–2000 ppm	±100 ppm	Vaisala
Air current speed	Series640	0–5 m·s <sup>-1</sup>	±0.1 m·s <sup>-1</sup>	Dwyer Instrument
PPF	PP-1	400–700 nm	±100 μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	PP System

F<sub>m</sub>'과 F<sub>m</sub>의 차이는 열의 소멸을 의미한다. F<sub>v</sub>'/F<sub>m</sub>'은 광화학효율을 의미하며 엽록소에 의해 흡수되는 광의 크기로 광화학 반응에 이용된다. 한 경로에 대한 광화학효율은 0에서 1까지의 값을 가질 수 있다. 또한 전체 가능한 경로에 대한 광화학효율의 합은 1.0이다. 건강한 잎에서 추출한 엽록체에 약한 광을 조사하면 광화학효율은 약 0.95이고, 형광의 양자수율은 0.05 정도 이거나 이보다 더 낮으며 그 외의 양자수율은 무시할 정도이다. 이 값이 크면 광합성 효율이 좋은 것을 의미하며 본 연구에서 광합성 효율의 지표로 사용하였다.

밀폐형 식물 생산시스템 내부의 미기상 변화와 식물과의 관계를 파악하기 위하여 미기상 변화에 따른 상추의 엽록소형광을 측정기(MINI-PAM, WALZ)를 이용하여 측정하였다. PPF의 경우 직접 조사되는 부분과 그늘진 곳의 F<sub>v</sub>'/F<sub>m</sub>' 값의 차이가 있기 때문에 직접 조사되는 잎을 선택하여 측정하였고 상추 한 개체에서 2개 이상의 잎을 선정하여 측정하였으며 측정값의 평균을 대표값으로 사용하였다. 엽록소형광의 측정은 정식 후 10일부터 측정하기 시작하여 35일까지 측정하였고 정식 후 35일이 지난 후에는 새로운 상추를 정식하여 사용하였으며 실험재배 횟수는 6번이었다. 밀폐형 식물 생산시스템 내부의 미기상을 변화시킬 때 마다 2시간의 적응 시간을 두었다.

광합성효율 모델을 개발하기 위하여 2종류의 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 각각의 환경요인이 식물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 6개 환경요인 중 5개는 고정하고 1개씩 변화시키면서 엽록소 형광을 측정하였다. 이 실험의 기본적인 환경설정은 자연조건에서 상추의 적정성장환경을 기본으로 기온은 22°C, PPF는 상추의 광포화점인 470 ± 30 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 상대습도는 65%, CO<sub>2</sub>농도는 470 ± 30 ppm으로 설정하여 재배하였고 명기의 시간은 12시간으로 하였다(Cho 등, 1998).

근권부 환경인 배양액 온도는 20°C로 설정하여 실험하였다. 두 번째 실험은 각 미기상 요인의 상호관계에 의한 식물의 반응을 파악하기 위하여 6가지 환경요인을 무작위로 변화시키면서 엽록소형광을 측정하였다.

#### 4. 유전알고리즘의 적용

6개의 변수를 포함하는 다변수 함수인 광합성효율모델의 최적해를 찾기 위해 유전알고리즘을 적용하였다. 유전알고리즘은 유전학과 자연 진화를 모방한 적응 탐색법이다. 복잡한 목적함수를 가지고 있는 최적화 문제에 대해 교배와 돌연변이 등의 유전적 조작과 생물진화 이론을 이용하여 시행착오적으로 최적치를 탐색해 나가는 알고리즘이다(Holland, 1975). 단순 유전알고리즘(Simple genetic algorithm: SGA)은 초기에 개발된 알고리즘임에도 불구하고 해를 찾는 능력이 뛰어나 아직도 많은 최적화 문제에 응용되고 있다(Goldbug, 1989). 최적화 프로그램은 JAVA Language(Java 2 Standard Development kit V 1.3.2, SUN, USA)를 사용하여 개발하였다.

생물의 진화 과정에 있어서 세대를 형성하는 개체들의 집합, 즉 개체군 중에서 환경에 대한 적합도가 높은 개체가 높은 확률로 살아남아 재생산할 수 있게 되며, 이때 교배 및 돌연변이로서 다음 세대의 개체군을 형성하게 된다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 미기상변화와 F<sub>v</sub>'/F<sub>m</sub>'

기온을 10°C에서 34°C까지 2°C씩 변화 시켜 상추의 엽록소 형광을 측정하였다. Fig. 3은 F<sub>v</sub>'/F<sub>m</sub>'과 기온과의 관계이고 결정계수는 0.84이었다. F<sub>v</sub>'/F<sub>m</sub>'이 최고인 값은 0.731이고 그 기온 때의 기온은 21°C였다. 밀폐형 식물 생산시설에서 상추의 재배온도는 20°C ±

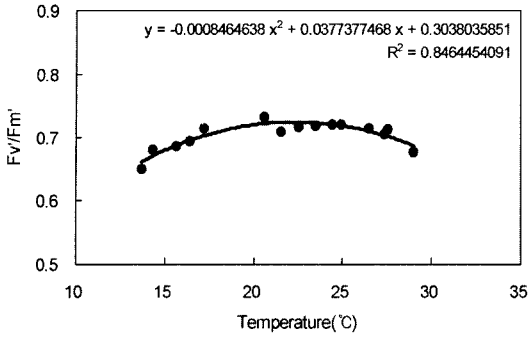


Fig. 3. Relationship between Fv/Fm' and leaf temperature.

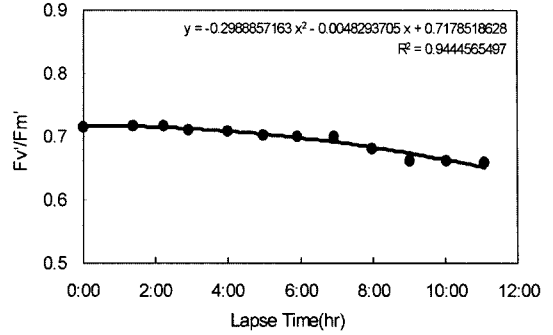


Fig. 5. Relationship between Fv/Fm' and photosynthesis duration time.

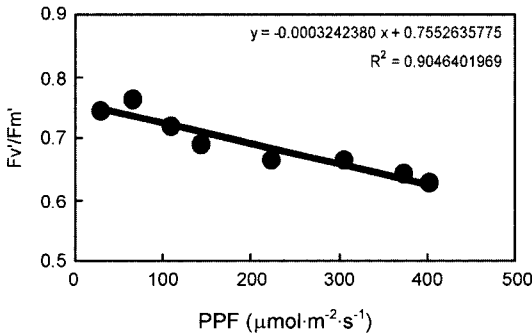


Fig. 4. Relationship between Fv/Fm' and PPF.

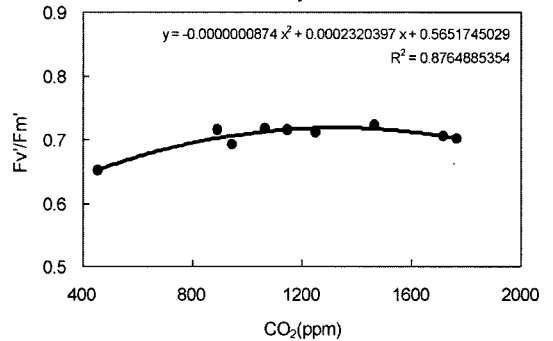


Fig. 6. Relationship between Fv/Fm' and CO<sub>2</sub> concentration.

2°C이며(Kitaya 등, 1998), 기온과 Fv/Fm'의 회귀모델을 이용하여 계산하면 22°C일 때 0.724의 최고값이 나왔다. Fig. 4는 광합성효율과 PPF의 관계를 나타낸 것이며 결정계수는 0.90이다. 가시광과 UV는 중요한 식물 환경스트레스 요인이다(Strid 등, 1994). 325  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 가시광을 식물앞에 2시간동안 조사한 결과 산소발생이 35~40% 감소하였고, 6  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 UV-B에 노출 시킨 경우 55~60% 감소하였다. 광의 강도뿐 아니라 노출 시간도 식물의 광합성에 영향을 준다(Sicora 등, 2003). Fig. 5는 PPF가 450  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 인 조건에서 지속시간과 광합성효율과의 관계이며 결정계수는 0.94이다. 광합성을 시작한 후 6시간이 경과하면서 광합성효율이 조금씩 떨어지기 시작하였다. Fig. 6은 CO<sub>2</sub>농도와 광합성효율과의 관계이며 결정계수는 0.87이다. CO<sub>2</sub>농도를 변화시켜 가며 측정된 Fv/Fm'의 값은 1,400 ppm일 때 최고값(0.723)이 측정되었고 회귀모델로 추정하면 1,200~1,400 ppm의 범위에서 최고값(0.719)이 계산되었다. Park과 Lee(1999)는 PPF 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상이고 CO<sub>2</sub>농도가 1,000

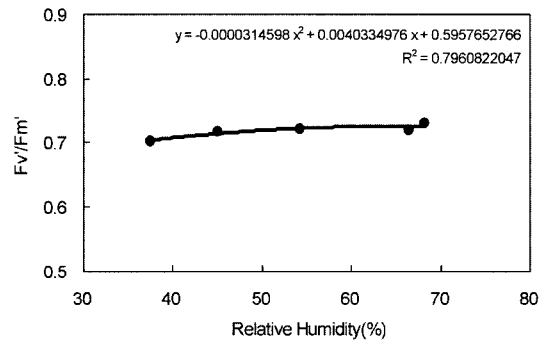


Fig. 7. Relationship between Fv/Fm' and relative humidity.

ppm에서 2,000 ppm 범위에서 상추의 생육이 가장 좋은 것으로 보고하였는데 본 실험의 결과와 유사한 결과를 보였다.

상대습도가 10~20%이면 기공이 닫혀 세포사이에 있는 CO<sub>2</sub>가 감소하여 광합성 능력이 감소하며(Grantz, 1990), 80~90% 높은 상대습도에서도 광합성이 떨어진다(Plulson 등, 2002). Fig. 7은 상대습도와 광합성효율과의 관계이며 결정계수는 0.79이다. 상대습도의 변

광합성효율 모델을 이용한 밀폐형 식물 생산시스템의 재배환경 최적화

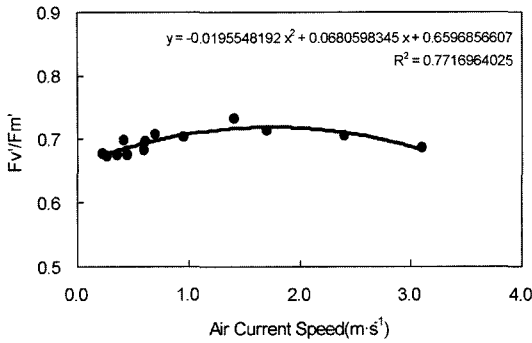


Fig. 8. Relationship between Fv/Fm' and air current speed.

화에 의한 Fv/Fm'는 68%일 때 최고값(0.730)이 측정되었고 회귀모델을 이용하여 추정하면 61~69%의 범위에서 최고값(0.725)이 계산되어 기존 연구와 유사한 결과를 나타냈다. Fig. 8은 기류속도와 광합성효율과의 관계이며 결정계수는 0.77이다. Fv/Fm'을 측정하면 1.4 m·s<sup>-1</sup>일 때 최고값(0.733)이 측정되었고 회귀모델에 의하여 추정된 값은 1.6~1.9 m·s<sup>-1</sup>에서 최고값(0.719)이 계산되었다. Kitaya 등(2003)은 기류속도가 0.01 m·s<sup>-1</sup>에서 2 m·s<sup>-1</sup>로 증가하면 순광합성속도도 증가한다고 보고하였는데 본 실험에서도 유사한 결과를 나타냈다.

근권부 온도는 발근에 있어서 중요한 환경요인중의 하나이며(Wilkerson과 Gates, 2003) 상추의 적정 근권부 온도는 15°C에서 25°C이며, 외부기온이 38°C일 때 근권부 온도를 20°C로 일정하게 유지하는 것이 광합성에 가장 좋았다(He 등, 2001). 본 실험에서도 유사한 결과를 나타냈다. Fig. 9는 배양액 온도와 Fv/Fm'의 관계이며 결정계수는 0.84이다. 배양액 온도가 20°C일 때 최고값(0.721)이 측정되었고 회귀모델에 의하여 추정된 값은 22°C일 때 최고값(0.713)이 추정되었다.

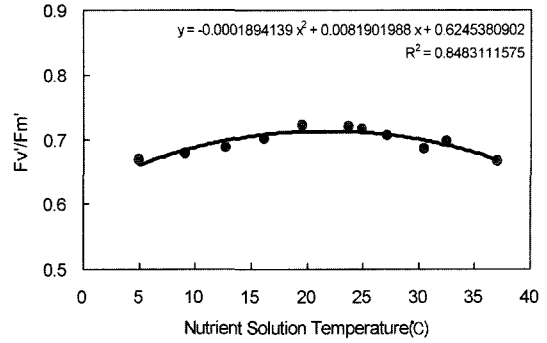


Fig. 9. Relationship between Fv/Fm' and nutrient solution temperature.

2. 광합성효율 모델

미기상과 식물간에는 복잡한 상호작용이 있다. 각 환경요인의 상호변화가 식물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 밀폐형 식물 생산시설 내부의 미기상을 무작위로 설정하여 Fv/Fm'을 측정하고 주성분 분석을 하였다. 주성분분석은 변수들의 선형결합을 통하여 변수들이 가지고 있는 전체정보를 최대한 설명할 수 있는 서로 독립적인 새로운 인공변수들을 유도하여 해석하는 다변량 분석방법이다. 다중회귀 모형은 유의수준 5%에서 유의 하였다. 따라서 6개의 주요환경인자 변수를 포함한 다중회귀 모형이 광합성효율을 설명하는데 유의한 것으로 나타났다(Table 2). Table 3은 각 주성분의 고유벡터를 나타낸 것이다. 첫 번째 주성분은 전체 표본 분산의 47.8%, 두 번째 주성분은 19.4%, 세 번째 주성분은 15.3%를 설명할 수 있고 나머지는 미약하다. 주성분분석 결과의 첫 번째 주성분 고유벡터와 각 미기상 요인의 회귀모델을 이용하여 식 (1)과 같은 광합성효율 모델을 개발하였다.

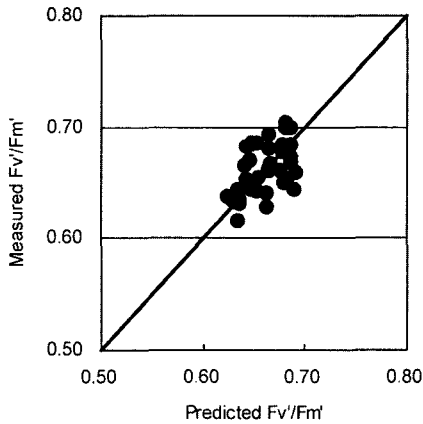
Table 2. Correlation analysis of measurement data (Fv'/Fm')

Item	T <sub>A</sub>	T <sub>N</sub>	CO <sub>2</sub>	V <sub>A</sub>	PPF	RH
T <sub>A</sub>	1.00000	0.53817	0.31822	-0.75489	-0.04482	0.54101
T <sub>N</sub>	0.53817	1.00000	0.00195	-0.49121	-0.29022	0.40131
CO <sub>2</sub>	0.31822	0.00195	1.00000	-0.20717	-0.33715	0.16739
V <sub>A</sub>	-0.75489	-0.49121	-0.20717	1.00000	0.20823	-0.49469
PPF	-0.04482	-0.29022	-0.33715	0.20823	1.00000	-0.48245
RH	0.54101	0.40131	0.16739	-0.49469	-0.48245	1.00000

T<sub>A</sub> : Ambient temperature, T<sub>N</sub> : Nutrient solution temperature, CO<sub>2</sub> : CO<sub>2</sub> concentration, V<sub>A</sub> : Air current speed, PPF : Photosynthesis photon flux, RH : Relative humidity

**Table 3.** Eigenvectors of measurement data (Fv'/Fm')

Item	PRIN1	PRIN2	PRIN3	PRIN4	PRIN5	PRIN6
T <sub>A</sub>	0.494630	0.305430	0.342539	-0.067036	0.197954	-0.707843
T <sub>N</sub>	0.413848	0.261297	-0.365086	0.697587	0.288165	0.239790
CO <sub>2</sub>	0.231897	-0.567929	0.667914	0.245861	0.204798	0.274194
V <sub>A</sub>	-0.487414	-0.249482	-0.170818	0.101464	0.741423	-0.333173
PPF	-0.290120	0.661829	0.441728	-0.118294	0.329683	0.400006
RH	0.456676	-0.125039	-0.281013	-0.651263	0.421228	0.308654
Proportion (%)	47.8	19.4	15.3	9.2	6.0	2.1



**Fig. 10.** Comparison of measured and predicted Fv'/Fm'.

$$\begin{aligned}
 Fv'/Fm'_{PEM} = & 0.49463f(T_A) + 0.413848f(T_N) \\
 & + 0.231897f(CO_2) - 0.487414f(V_A) \\
 & - 0.29013f(PPF) + 0.456676f(RH) \\
 & + 0.06
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Fig. 10은 측정값과 식(1)을 이용하여 예측한 값을 비교한 것이다. 검증에 사용된 실험 자료는 모델개발에 이용된 자료와 다른 40개의 자료를 이용하였다. 실험에서 측정된 Fv'/Fm'과 광합성효율 모델에 의해서 예측된 값과의 오차는 0~5.8%이며 평균은 2.5%였다.

### 3. 유전알고리즘을 이용한 재배환경 최적화 프로그램

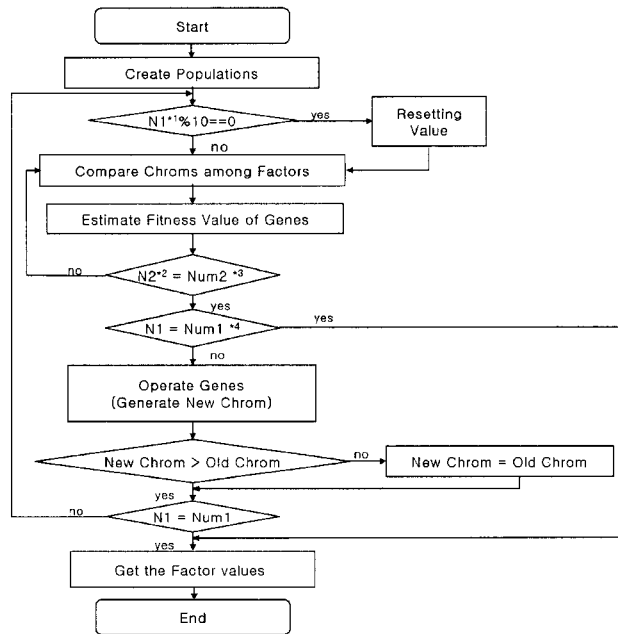
광합성효율모델에 유전알고리즘을 적용하기 위하여 먼저 개체군의 크기를 결정해야 한다. 각각의 개체는 염색체를 가지고 있으며 염색체는 복수개의 유전자의 집합으로 구성된다. 즉, 광합성효율모델에서 각 미기상 변수가 유전자가 되며 이 유전자들의 집합인 광합성효율모델이 개체군이 된다. 유전자를 생성하는 데 있어서 우선 결정해야할 요인은 각 미기상인자의 염색체 수와 크기이다. 염색체의 수는 유전자가 적합도에 가까운 값을 갖게 하는 확률을 높이기 위해 10개로 정하였고 개체의 수는 100, 유전하는 세대는 10세대로 하였다. 개체의 수를 증가 시키면 종의 다양해지고, 유전하는 세대를 증가시키면 종의 다양성은 저하되지만 적합도의 정밀도는 높아진다. Table 4는 프로그램에 사용된 환경인자의 염색체 수와 크기이다.

재배환경 최적화 프로그램으로부터 상추의 최적 재배환경을 추정해 보면 기온 22°C, CO<sub>2</sub>는 1,400 ppm, 상대습도는 65%, 기류속도는 1.0 m·s<sup>-1</sup>, 배양액온도는 19°C, PPF는 430 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>로 계산되었다. 인공 광을 이용하여 PPF를 100, 150, 200, 300 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>의 4단계로 상추를 재배한 결과 200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>이고 CO<sub>2</sub>농도가 1,000~2,000 ppm 사이에서 상추의 광합성속도가 좋은 것으로 나타났다(Park과 Lee,

**Table 4.** Decision of chromosome (data degree size)

Factor	Data degree	Start point	Final point	Range	Size of chromosome	Fixed data range
Ambient temperature (°C)	1	0	40	40	6	0.635
Nutrient solution temperature (°C)	1	0	40	40	6	0.635
Relative humidity (%)	5	25	100	75	4	5
Air current speed (m·sec <sup>-1</sup> )	0.1	0	2.0	2.0	5	0.0645
CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	15	300	2000	1700	7	13.386
PPF (m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	15	0	700	700	6	11.111

광합성효율 모델을 이용한 밀폐형 식물 생산시스템의 재배환경 최적화



\*1 : The current number of genes      \*2 : The current number of chroms  
 \*3 : The number of genes              \*4 : The number of chroms

Fig. 11. Flowchart of PEM estimation program.

1999). 기류속도와 광합성속도의 관계가 식물의 재배조건 또는 상대습도에 따라 다르게 나타나며 상대습도가 높을 수록 기류속도가 빨라야 광합성 속도가 증가하였다. 즉, 상대습도가 65%이고 기류속도가 0.5~0.8 m·s<sup>-1</sup> 일 때 최대 광합성속도를 보였고, 상대습도가 80%일 때는 기류속도가 1.0~1.5 m·s<sup>-1</sup>에서 최대 광합성속도를 보였다(Yabuki와 Miyagawa, 1970). 외부기온이 최저 24°C 최고 44°C일 때 근권부 온도를 15~25°C로 유지 할 때 상추의 생육이 좋았다(He 등, 2001). 광합성효율을 이용한 상추의 최적재배환경과 같은 조건은 아니지만 다른 연구자의 연구 결과를 비교해 볼 때 유사한 결과를 나타내었다.

적 요

본 연구에서는 폐쇄형 식물 생산시스템 내에서 생체 정보에 의한 최적 환경제어와 식물의 환경스트레스 판단을 위하여 엽록소형광 분석법으로 광합성효율 모델을 만들었으며, 광합성효율 모델에 유전알고리즘을 적용하여 재배환경 최적화 프로그램의 응용성을 평가 하

였다.

6가지 미기상 요인 중 5가지는 고정하고 1가지씩만 변화시켜 가며 측정된 Fv/Fm이 최대가 되는 환경조건은 기온 21°C, CO<sub>2</sub>농도 1,200~14,00 ppm, 상대습도 68%, 기류속도 1.4 m·s<sup>-1</sup>, 배양액온도 20°C이었으며 PPF가 140 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 보다 증가할수록 광합성효율은 감소하였다. 광합성효율모델의 오차는 평균 2.5%였다.

재배환경 최적화 프로그램으로부터 계산된 밀폐형 식물 생산시스템내에서 상추의 최적재배환경조건은 기온 22°C, 배양액온도 19°C, CO<sub>2</sub>농도 1,400 ppm, 기류속도 1.0 m·s<sup>-1</sup>, PPF 430 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 상대습도 65%이다.

이상의 연구 결과로부터 광합성 효율 모델을 이용하여 식물 생산시설의 환경모니터링 시스템과 식물 생체 정보에 의한 최적제어시스템의 개발이 가능함을 확인하였다.

주제어 : 광합성효율모델, 엽록소형광, 유전알고리즘, 주성분분석, JAVA

인 용 문 헌

1. Balachandran, S., C.B. Osmond, and P.E. Daley. 1994. Diagnosis of the earliest strain-specific interactions between tobacco mosaic virus chloroplasts of tobacco leaves in vivo by means of chlorophyll fluorescence imaging. *J. Plant Physiology* 104:1059-1065.
2. Cho, Y. R., D. W. Han., and B. Y. Lee. 1998. Effect of artificial light sources on the growth of crisphead lettuce in plant factory. *J. Bio. Fac. Env.* 7(1):35-42(in Korean).
3. Goldbug, D., B. Korb, and K. Deb. 1989. Messy genetic algorithms: motivation, analysis, and first results. *Complex Systems* 3:493-530.
4. Govindjee 1995. Sixty-three years since Kautsky: Chlorophyll a fluorescence. *Aust. J. Plant Physiol.* 22:131-160.
5. Grantz, D. A. 1990. Plant responses to atmospheric humidity. *Plant Cell Environ* 13:667-679.
6. Haitz, M., and Lichtenthaler, H. K. 1988. The measurement of Rfd-values as plant vitality indices with the portable field fluorometer and the PAM-fluorometer. In *Applications of chlorophyll fluorescence* (Lichtenthaler, H. K., ed). pp. 249-254, Kluwer.
7. He, J., S. K. Lee and I. C. Dodd. 2001. Limitations to photosynthesis of lettuce grown under tropical conditions: alleviation by root-zone cooling. *Journal of Experimental Botany.* 52(359):1323-1330.
8. Holland, H. J. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems.* Michigan.: The University of Michigan.
9. Lichtenthaler, H. K. 1992 Kautsky effect: 60 years of chlorophyll fluorescence induction kinetics. *Photosynthetica* 27:45-55.
10. Kim Y. H., and Toyoki Kozai. 1996. Effects of Air Current Speed on the Microclimates of the Plug Stand under Artificial Light. *J. Bio. Fac. Env.* 5(2):160-166(in Korean).
11. Kitaya Y., J. Tsuruyama, T. Shubuya, M. Yoshida and M. Kiyota. 2003. Effect of air current speed on gas exchange in plant leaves and plant canopies. *Adv. Space Res.* 31(1):177-182.
12. Park, M. H. and Y. B. Lee. 1999. Effects of CO<sub>2</sub> concentration, light intensity and nutrient level on the growth of leaf lettuce in a plant factory. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 40(4):431-435.
13. Plulson M. E., E. E. Gerald and B. John. 2002. Photosynthesis is limited at high leaf air vapor pressure deficit in a mutant of *Arabidopsis thaliana* that lacks trienoic fatty acids. *Photosynthesis Research* 72:55-62.
14. Schreiber, U., W. Bilger, C. Klughammer and C. Neubauer. 1998. Application of the PAM fluorometer in stress detection. In *Applications of chlorophyll fluorescence in photosynthesis research, stress physiology, hydrobiology and remote sensing*, 151-155.:Kluwer academic publishers.
15. Sicora C., M. Zotán and V. Imre. 2003. The interaction of visible and UV-B light during photodamage and repair of photosystem II. *Photosynthesis Research* 75: 127-137.
16. Strid A., W.S. Chow and J.M. Anderson. 1994. UV-B damage and protection at the molecular level in plants. *Photosynthesis Research* 39:475-489.
17. Wilkerson, E. G. and R. S. Gates. 2003. Controlled environment system for studying root zone temperature effects on cutting propagation. *Applied Engineering in Agriculture* 19(4):483-489.
18. Willits, D. H. and M. M. Peet. 1999. Using chlorophyll fluorescence to model leaf photosynthesis in greenhouse pepper and tomato. *Acta. Hort.* 507:311-315.
19. Yabuki, K. and H. Miyagawa. 1970. Studies on the effect of wind speed and photosynthesis II-The relation between wind speed and photosynthesis. *J. Agricultural Meteorology* 26(3):137-142.