

Mathematical Models of Photosynthetic Rate of Hydroponically Grown Cucumber Plants as Affected by Light Intensity, Air Temperature, Carbon Dioxide and Leaf Nitrogen Content

Lim, June Taeg* · Baek, Sun Young · Jeong, Hyun Hee · Hyun, Kyu Hawn
Kwon, Byung Sun · Kim, Hak Jin · Chung, Soon Ju¹ · Lee, Beom Seon¹

Dept. of Resource Plant, Sunchon National University, Suncheon 540-742, Korea

¹Faculty of Applied Science, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

Abstract

Gross photosynthetic rates of leaves of hydroponically grown cucumber plants (*Cucumis sativus* L. cv. Guwoosalichungjang) were measured under various conditions of photosynthetic photon flux (PPF), ambient CO₂ concentration, air temperature and leaf nitrogen contents. Light compensation point of leaf photosynthesis appeared to be in the range of 10–20 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and light saturation point be above 1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Gross photosynthetic rates increased persistently and asymptotically as air temperature rose from 12°C to 32°C. However, there were only small differences in gross photosynthetic rates in the range of 24–32°C, so that the range seemed to be optimal for photosynthesis of cucumber plants at the condition of CO₂ concentration of 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ and PPF of around 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. CO₂ compensation point of leaf photosynthesis appeared to be in the range of 20–40 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ and CO₂ saturation point be above 1200 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. Gross photosynthetic rates increased sigmoidally as leaf nitrogen content increased. These environmental factors interacted synergistically to enhance gross photosynthetic rate, so that the rate increased multiplicatively as level of one factor increased progressively with higher levels of the other factors. Mathematical models were developed to estimate the gross photosynthetic rate in accordance with the variations of these environmental factors. These models can be used not only to explain the variation of growth or yield of cucumber plants under different environmental conditions but also as building blocks of plant growth model or expert system of cucumber plants.

Key words : *Cucumis sativus* L., Gross photosynthetic rate, hydroponics, light, CO₂, temperature, leaf nitrogen content, mathematical model of gross photosynthetic rate, GPR, PPF.

*Corresponding author

This study was supported by SGRP-HTDP (High-Technology Development Project for Agriculture and Forestry) in 1996.

서 론

식물의 생장은 식물의 총광합성량에서 총호흡량을 뺀 것으로 이루어진다. 환경조건에 따른 식물생육의 변이는 그 조건에 따른 식물의 광합성속도와 호흡속도의 변이를 살펴봄으로써 설명할 수 있다. 단위엽면적당 광합성속도에 영향을 미치는 환경요인으로서 광도, 온도, 대기중의 CO₂ 농도 등을 들 수 있으며 수분이 충분치 못한 조건에서는 엽의 수분포텐셜이나 대기의 상대습도가 영향을 미친다. 또한 토양이나 양액의 질소함량

이 높아질수록 질소흡수율이 증가하고 엽중 질소함량이 증가함을 감안할 때 토양이나 양액의 질소함량도 단위엽면적당 광합성속도에 영향을 미칠 것이다.

유리온실이나 플라스틱하우스 내에서 작물을 재배할 때 최적의 환경조건을 부여하여 다수확을 꾀하는 것은 농가 경영상 매우 중요한 일이다. 밀폐된 공간 내에서 여러 환경조건을 어떻게 조절해 주는가는 주어진 환경조건에서 작물의 성장 내지는 수량반응을 밝혀냄으로써 해결할 수 있다. 환경조건에 따른 작물 생육이나 수량의 변이는 그 조건에 따른 작물의 광합성속도와

호흡속도의 변이에 의해 지배된다. 따라서 최적 환경조건은 그 조건하의 광합성속도와 호흡속도의 다소에 의해 결정된다. 본 연구의 목적은 여러 환경요인의 변화에 따른 오이 엽의 광합성속도의 변화를 밝히고 이를 설명할 수 있는 수리적 모형을 개발하여 오이의 식물 성장모형이나 경영합리화를 위한 오이 생산 전문가 시스템 개발에 필요한 기초자료를 제공하는데 있다.

재료 및 방법

본 실험에서 식물의 광합성에 관여하는 여러 기상환경, 즉 광도, 온도, CO₂ 농도와 엽중 질소함량을 달리한 후 오이 엽의 광합성속도를 측정하였다. 오이를 포트에 피종하여 생장시킨 후 피종 20일에 Growth Chamber (CONVIRON, PGV36)내 Hoagland액을 채운 48 L의 container에 정식하였다. 생장조건은 주야간온도 24/16°C, 광량 450-550 μmol · m⁻² · s⁻¹이었으며 엽수가 3~7매 때 광합성속도를 측정하였다. 엽의 광합성속도는 Gas Exchange Measuring Station (Heinz Walz GmbH Co, Germany)을 이용하여 측정하였다 (Fig. 1).

이 측정기는 기온 조절장치가 장착된 20 L 용적의 glass 챔버 4개, 1층 옥상에서 공기를 흡입하여 챔버로 보내는 공기압축기 2개(최대 50 L · min⁻¹의 속도로

공기를 보낼 수 있음), 챔버에 유입되는 공기의 상대습도와 CO₂ 농도를 일정하게 조절하는 장치, 유입되는 공기의 속도를 조절하는 유량계, 그리고 적외선 가스 분석계로 구성된다. 광원(Sylvanina Cool White, 16 W, USA & Royal Country 60 W, 130V, Canada)은 챔버 위에 설치되어 있고, 챔버에는 그 용적이 20 L인 만큼 생육초기 단계의 식물 개체를(오이의 엽수가 7~8매 까지 생육 가능함) 넣을 수 있는데 공기 압축기로부터 상대습도 조절기, CO₂ 농도 조절기, 유량계를 거친 공기가 플라스틱 튜브를 통하여 일정 속도로 챔버에 들어와서 적외선 가스 분석계로 보내진다. 플라스틱 튜브를 통하여 챔버로 유입되는 공기의 상대습도는 dew point를 설정해 줌으로서 조절되며, CO₂ 농도는 공기를 Soda Lime에 통과시키거나 CO₂ 가스 통으로부터 CO₂ 유입량을 달리함으로써, 그리고 광량은 광원의 높이를 달리함으로써 조절한다. 챔버 내 기온은 내부에 부착된 온도 조절장치에 의해 조절된다. 상대습도와 CO₂ 농도가 동일한 공기를 일정 속도로 4개의 챔버에 나누어 보내게 되는데 이 중 한 챔버에는 식물을 넣지 않았다. 광도와 기온이 일정한 조건에서 식물이 들어 있는 챔버와 들어 있지 않은 챔버를 통해 유출되는 공기의 CO₂ 농도를 잰 후 그 차이를 통해 순광합성속도를 계산했다.

광량은 10 μmol · m⁻² · s⁻¹의 저수준에서부터 1100

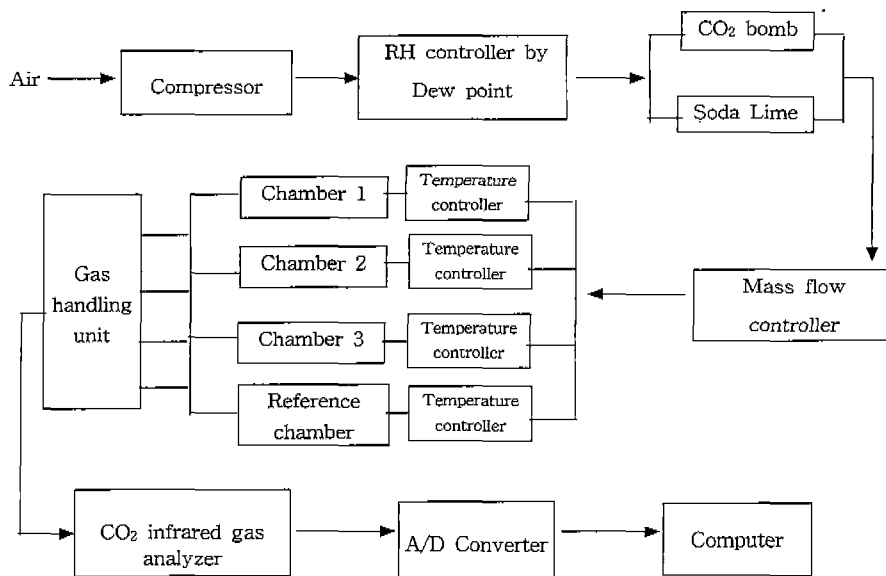


Fig. 1. Schematic diagram of Gas Exchange Measuring Station.

광도, 온도, CO₂ 농도 및 엽중 질소농도의 변화에 따른 양액재배 오이의 광합성속도에 관한 수리적 모형

$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 수준까지 변화를 주었고, 기온은 12°C부터 32°C까지 4°C 간격으로 달리하였으며, CO₂ 농도는 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 에서부터 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 이상까지 변화를 주어 각 요인에 따른 엽의 순광합성 속도를 측정하였다. 엽의 총광합성속도는 순광합성 속도를 측정하는 다음 암흑상태에서 개체의 호흡속도를 측정 후 엽을 제거한 줄기의 호흡을 측정하여 그 차를 엽의 호흡속도로 보고 이를 순광합성속도와 합하여 계산하였다. 광도와 온도와의 상호작용에 의한 광합성 속도의 변화를 알아보기 위해 기온 12°C부터 32°C까지 4°C 간격으로 변온을 주면서 광도를 증가시켰고, 광도와 CO₂ 농도의 상호작용에 의한 광합성속도의 변화를 알아보기 위해 광도와 CO₂ 농도를 여러 수준으로 달리하였으며, 또한 광도, CO₂ 농도 및 온도를 달리하여 엽의 총광합성속도를 측정하였다. 엽중 질소함량은 양액 공급을 중단한 기간이 길어질수록 낮아진다는 점에 착안하여 이들 기상환경 요인들을 달리하여 엽의 총광합성속도를 측정하였다. 환경조건에 따른 총광합성속도를 예측하는 모형식에서의 모수 추정은 SAS NLIN의 DUD법에 따랐다.

결과 및 고찰

1. 광도에 따른 오이의 광합성속도 변화

광과장중 가시광선 영역의 파장을 가진 광량이 단 위치시간당 단위 면적을 통과하는 수를 PPF (photosynthetic photon flux)라 하는데 상대습도 70%, CO₂ 농도, 그리고 24°C의 기온에서 PPF를 달리하여 총광합성속도 (gross photosynthetic rate, GPR)을 조사하였던 바 전형적인 Michaelis-Menten 형의 변이를 보였다. 광도에 따른 총광합성속도의 예측식으로

$$\text{GPR} = 18.6884 * \text{PPF} / (338.672 + \text{PPF})$$

을 얻었는데(Fig. 2), 이때 GPR과 PPF의 단위는 각각 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 과 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이다.

오이의 광량에 대한 반응은 개체에 따라 다소 변이는 보였지만 광포화점은 $10 \sim 20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 정도로 낮았으며 광포화점은 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상인 것을 알 수 있었다. 이는 오이가 매우 낮은 광량에서도 광합성을 할 수 있을 뿐 아니라 높은 광량에서도

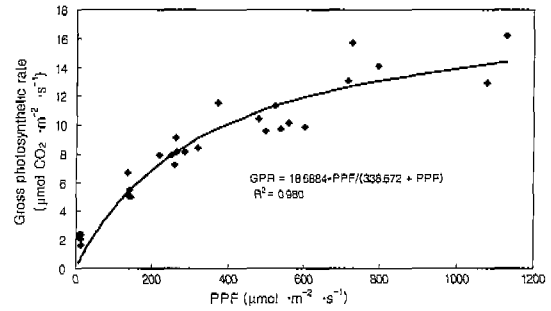


Fig. 2. Response of gross photosynthetic rate due to the variation of PPF.

광합성속도가 지속적으로 증가하고 있음을 나타낸다. 오이 엽의 최대 순광합성 속도는 광량에 따라 $11 \sim 30 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{dm}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 사이에 분포하는데 (Pharr et al., 1985; Robbins and Pharr, 1987) 이는 $6.94 \sim 18.94 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에 해당하며 호흡속도가 총광합성속도의 15%임을 감안하여 환산하면 총광합성 속도는 $8 \sim 21.78 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이며 본 연구의 측정 결과와 잘 일치되었다.

2. 온도에 대한 광합성 반응

오이의 생육 최저 온도는 12°C로 알려져 있으며 온도에 따른 오이의 광합성속도를 알아보기 위하여 상대 습도는 70%, CO₂ 농도, 그리고 약 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 12°C부터 32°C까지 4°C 간격으로 변온을 주어 총광합성 속도를 측정된 결과

$$\text{GPR} = 19.071 (1 - 1.3704 \exp(-0.0571 * T))$$

을 얻었는데, 이때 T는 온도(°C)이다(Fig. 3). 오이

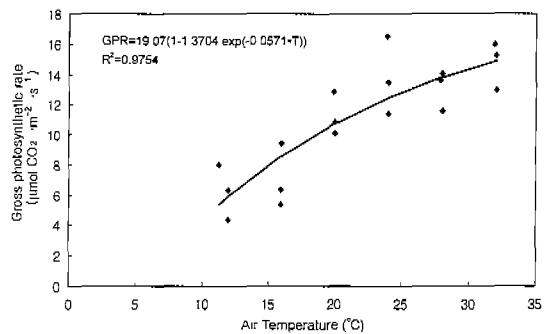


Fig. 3. Response of gross photosynthetic rate due to the variations of air temperature.

의 총광합성속도는 온도가 상승할수록 증가속도는 감소 하지만 지속적인 증가를 보였다. Acock et al.(1990)에 의하면 멜론에서의 순광합성속도는 20°C에서 40°C로 높아질수록 유의하게 증가한다고 하였고 Kitroongruang et al.(1992)은 기온의 상승에 따라 지속적인 증가를 보 이다가 50°C 정도 이상의 높은 온도에서 heat stress를 받아 광합성 속도가 떨어지는 것으로 보고하였다. 그러나 본 실험의 결과 광합성 속도에 큰 차이를 나타내 지 않았는데 이는 24~32°C 사이가 오이 생육에 대한 적정온도로 생각되었다.

3. CO₂ 농도에 대한 광합성 반응

식물체의 92% 정도가 대기의 CO₂를 동화하여 만 들어진 탄수화물로 구성되어있음을 고려할 때 대기 중 CO₂ 농도의 중요성은 매우 크다고 할 수 있다. 겨울 철 보온을 위해 밀폐된 유리온실이나 플라스틱하우스 에서 CO₂ 발생기를 통해 CO₂를 공급하는 것을 권장 하고 있는 만큼 잎의 CO₂ 농도에 대한 광합성 반응 을 알아보는 것은 중요하다 할 것이다. 상대습도 70 %, 기온 24°C, 그리고 약 400 μmol · m⁻² · s⁻¹의 광량에서 CO₂ 농도에 따른 총광합성 속도의 반응은 Michaelis-Menten 식에 의해 잘 설명되었던 바

$$GPR = 19.6385 * CO_2 / (401.9447 + CO_2)$$

의 식을 얻었는데(Fig. 4), 이때 CO₂는 대기의 CO₂ 농도(μmol · mol⁻¹)이다. 본 실험에서 CO₂ 보상점 은 20~40 μmol · mol⁻¹ 사이에 위치하는 것으로 나타 났으며, CO₂ 포화점은 1200~1300 μmol · mol⁻¹ 사이 로 나타났다. Challa(1976)에 의하면 CO₂ 농도를 0~

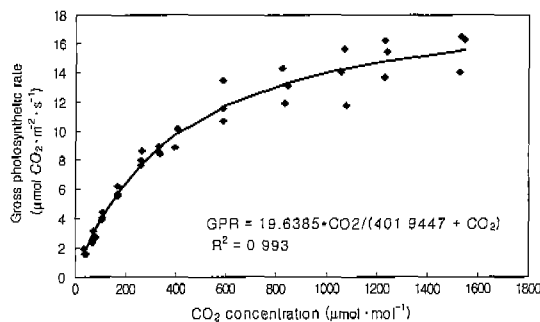


Fig. 4. Responses of gross photosynthetic rate under various CO₂ concentration.

1500 μmol · mol⁻¹에 두고 총광합성 속도를 측정해 보 았던 바 Michaelis-Menten 형의 반응을 얻었으며 half maximum CO₂ 농도는 작형에 따라 250~400 μmol · mol⁻¹ 사이에 위치하였고 CO₂ 포화점은 1200 μmol · mol⁻¹ 이상이었는데 이는 본 연구와 일치하는 결과였다.

4. 엽중 질소 함량과 총광합성속도

C₃ 작물의 광합성 작용에 맨 처음 촉매작용을 하는 효소는 RUBP Carboxylase로서 이 함량은 엽중 질소 함량에 비례하여 증가한다. 또한 광합성 작용이 직접 이루어지는 엽록소도 질소가 구성성분이므로 엽중 질 소 함량의 증가에 따라 광합성 속도의 증가는 당연하 다. 본 연구에서 측정된 엽중 질소 함량에 따른 잎의 총광합성 속도의 변이는 logistic curve에 의해 비교적 잘 설명되었던 바

$$GPR = 24.747 / (1 + 6.035 \exp(-0.3689 * N))$$

의 모형식을 얻었는데(Fig. 5) 이때 N은 엽중 질소 함량(%)이다. 엽중 질소함량에 따른 총광합성속도의 반응은 이와 유사한 형태임은 많은 연구자들에 의해 밝 혀진 바 있다(Tolley-Henry and Raper, 1986; Boote et al., 1978; Lim et al., 1990; Lugg and Sinclair, 1981).

5. 광도와 온도, 광도와 CO₂ 농도, 그리고 온도와 CO₂ 농도의 상호작용에 의한 광합성속도

기온을 12°C부터 32°C까지 4°C 간격으로 변온을 주면서 광도를 증가시켜 주었던 바 온도가 증가할수록 접근하는 최대 총광합성 속도는 증가하는 경향이였다

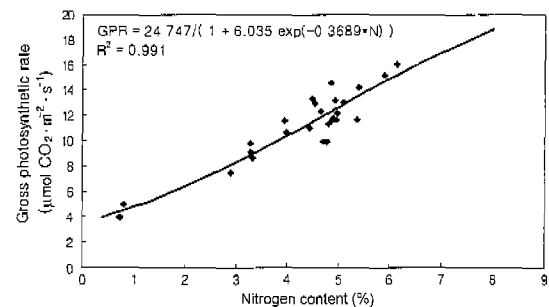


Fig. 5. Responses of gross photosynthetic rate due to various content of leaf nitrogen.

광도, 온도, CO₂ 농도 및 엽층 질소농도의 변화에 따른 양액재배 오이의 광합성속도에 관한 수리적 모형

Table 1. Estimated values of parameters in model equation predicting gross photosynthetic rate of cucumber leaves under various light intensity at a given air temperature

Air temperature(°C)	Coefficient Pmax	Coefficient k	Degree of freedom	R ²
12	9.6983	59.335	28	0.989
16	12.6706	104.390	22	0.993
20	15.3290	176.513	25	0.988
24	18.6884	338.672	25	0.980
28	17.4923	320.564	10	0.989
32	19.0576	378.978	28	0.987

Model eqn. $Gpr = Pmax * PPF / (k + PPF)$

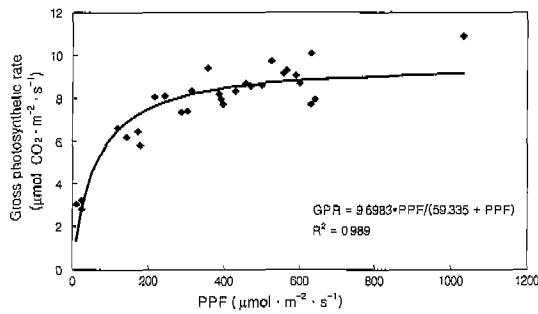


Fig. 6. Response of gross photosynthetic rate due to the variation of PPF.

(Table 1). 12°C에서는 광포화점이 600 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 정도이고 최대 총광합성 속도가 9.70 $\mu\text{mol} \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 인(Fig. 6) 반면 온도의 상승에 따라 이들 값들이 점점 증가하다가 32°C에서는 광 포화점이 1100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상이었고 최대 광합성 속도도 19.06 $\mu\text{mol} \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 (Table 1) 증가하였는데 이는 광도의 상승에 대한 총광합성 속도의 증가가 온도의 상승에 의해 보다 효과적임을 말해 준다. 광도와 온도의 상호작용을 고려하여 이들의 변이에 따른 총광합성 속도의 변이를 설명하는 식을 여러 모형을 통해 만들어 보았던 바 그 중 가장 적합도가 좋은 모형식은

$$GPR = 4.1485 (1 - 40.9673 \exp(-0.4552 * T)) (1 - 0.8493 \exp(-0.0027 * PPF)),$$

이었는데(Fig. 7), 이때 T와 PPF는 각각 온도 (°C)와 광도 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)이다. Fig. 7의 직선은 45° 선으로 측정치와 모형에 의해 추정된 값이 잘 일치할수록 좌표상의 점들이 선상에 위치하게 된다. Klueter et al.(1973)에 의하면 1000 ft-c의 약광하에서는 20

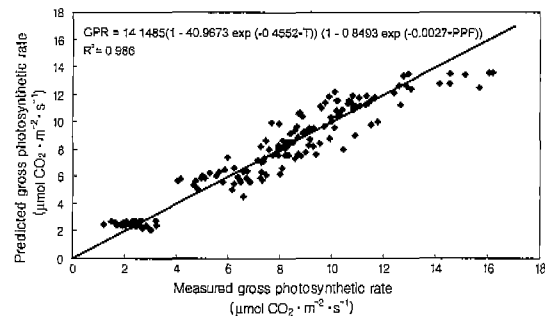


Fig. 7. Comparisons of observed values of gross photosynthetic rate of cucumber leaves with the predicted values by the model equation.

°C에서 최대 순광합성 속도를 보인 반면 8000 ft-c의 높은 광도에서는 40°C까지도 순광합성 속도는 증가하였으며, 8000 ft-c 광 조건에서 44°C의 높은 온도는 오이의 생육에 지장이 없을 뿐 아니라 최대 순광합성 속도를 나타내 결과적으로 가장 빠른 생육을 가져왔다고 하였는데 이는 본 연구의 결과와 일치한다.

광도와 CO₂ 농도를 여러 수준으로 달리하여 오이 잎의 총광합성 속도를 측정했던 바 광도와 CO₂ 농도도 총광합성 속도에 상승작용을 보였으며, 광도에 대한 광합성 속도의 반응식과 CO₂ 농도에 대한 반응식을 곱하여 모수들을 다시 추정하였던 바

$$GPR = 50.149 * PPF / (501.437 + PPF) * CO_2 / (316.114 + CO_2)$$

모형식을 얻었는데(Fig. 8), 이때 CO₂는 대기의 CO₂ 농도 ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)이다. Challa(1976)에 의하면 광도를 0~200 W·m⁻² 범위에서 달리하고 가을작형 오이에서는 CO₂ 농도를 300과 1580 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 봄작

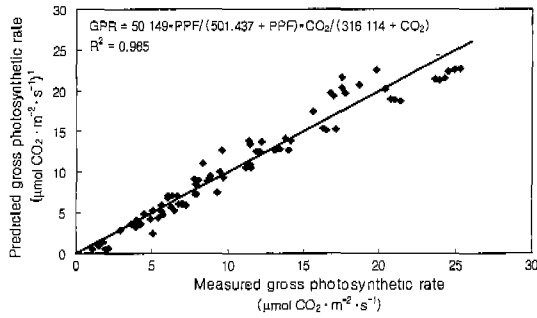


Fig. 8. Comparisons of observed values of gross photosynthetic rate of cucumber leaves with the predicted values by the model equation.

형 오이에서는 CO₂ 농도를 300과 1500 μmol · mol⁻¹의 두 수준에서 총광합성 속도를 측정하였던 바 작형에 관계없이 모든 CO₂ 농도에서 광도에 대한 총광합성 속도가 Michaelis-Menten 형의 반응을 보였는데 이는 본 연구의 결과와 잘 일치했다.

광도를 400~500 μmol · m⁻² · s⁻¹ 수준에 두고 온도를 12~32°C, CO₂ 농도를 20~1055 μmol · mol⁻¹ 범위에서 달리하여 총광합성 속도를 측정했던 바 온도와 CO₂ 농도도 총광합성 속도에 상승작용을 보였으며, 온도에 대한 광합성 속도의 반응식과 CO₂ 농도에 대한 반응식을 곱하여 모수들을 다시 추정하였던 바

$$GPR = 20.214 * (1 - 9.081 \exp(-0.3211 * T)) * CO_2 / (363.300 + CO_2)$$

모형식을 얻었는데(Fig. 9), 이때 T는 기온이고 CO₂는 대기의 CO₂ 농도 (μmol · mol⁻¹)이다.

두 환경요인 간의 상호작용에 의한 총광합성 속도에

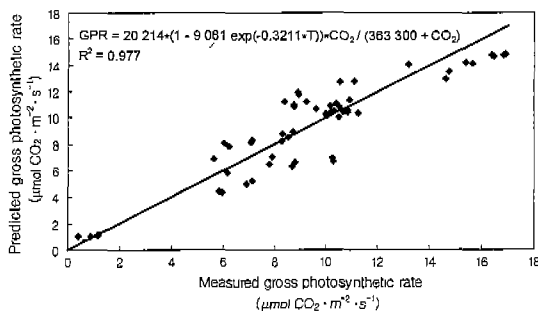


Fig. 9. Comparisons of observed values of gross photosynthetic rate of cucumber leaves with the predicted values by the model equation.

대한 상승작용을 살펴보면 광도와 CO₂, 온도와 CO₂, 그리고 온도와 광도의 순으로 상승작용이 크게 나타났는데 특히 광도가 높고 CO₂ 농도가 높을 때 총광합성 속도는 25 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹ 보다 높게 나타났다(Fig. 7). Hand(1984)에 의하면 광도가 낮은 겨울 재배 오이에서는 온실 내 CO₂ 농도를 1000 μmol · mol⁻¹으로 높여준 결과 순광합성 속도는 50%까지 증가하였고 수량은 20~40% 정도 증가하였으며 광도가 높은 늦은 봄이나 여름 재배 오이에서도 낮 동안의 평균 CO₂ 농도를 10% 올림에 따라 상품성 오이의 수량은 5% 증가하였음을 보고하였다. Peet and Willits(1987)에 의하면 봄 작형 오이에서는 온실 내 CO₂ 농도가 가장 높은 수준에서 수량이 가장 많았던 반면 가을 작형에서는 반대로 CO₂ 농도가 낮은 처리에서 수량이 많았는데 이는 가을 작형에서 상대적으로 온도가 낮고 광도가 낮아 CO₂ 포화점이 낮은데 기인한다고 하였다. 그러나 장기간 온실 내 CO₂ 농도를 높이는 것에 대한 부정적인 연구 결과들도 있다. Peet et al.(1986)에 의하면 온실 내 CO₂ 농도를 높여주면 초기에는 순광합성 속도이나 생장이 촉진되나 장기간 CO₂ 농도를 높여주면 엽에 전분이 축적되어 생육 후기에는 광합성 속도이나 생육이 대기의 CO₂ 농도에서 자란 오이보다 낮았다고 했다. 따라서 밀폐된 공간 내 CO₂ 농도의 설정은 오이의 상대생장율이나 sink의 크기 그리고 광도나 온도와 같은 다른 환경요인에 비추어 결정해야 할 것이다.

6. 광도, CO₂ 농도, 온도 및 엽중 질소함량의 상호작용에 의한 총 광합성속도의 변화

온도, 광도 및 CO₂ 농도를 여러 수준으로 달리하여 오이 잎의 총광합성 속도를 측정했던 바 온도, 광도 및 CO₂ 농도는 총광합성 속도에 상호간 상승작용을 보였으며, 온도, 광도, CO₂ 농도에 대한 반응식을 곱하여 모수들을 다시 추정하였던 바

$$GPR = 38.878(1 - 4.1942 \exp(-0.2256 * T)) * PPF / (253.993 + PPF) * CO_2 / (373.663 + CO_2),$$

의 모형식을 얻었다(Fig. 10).

엽중질소 함량에 따른 총광합성 속도를 측정한 자료의 CO₂ 농도, 광도, 온도를 이용하여 이들 요인의 상

광도, 온도, CO₂ 농도 및 엽중 질소농도의 변화에 따른 양액재배 오이의 광합성속도에 관한 수리적 모형

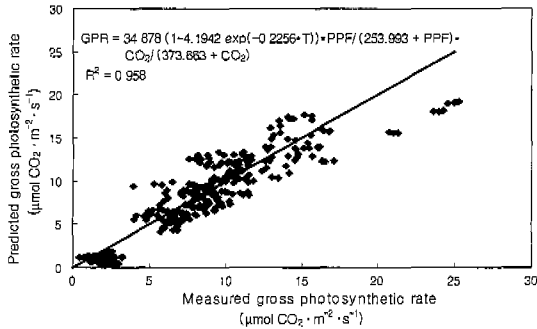


Fig. 10. Comparisons of observed values of gross photosynthetic rate of cucumber leaves with the predicted values by the model equation.

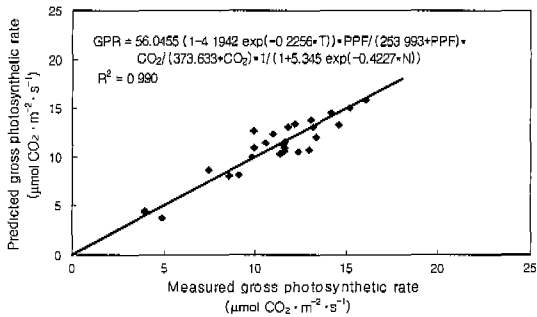


Fig. 11. Comparisons of observed values of gross photosynthetic rate of cucumber leaves with the predicted values by the model equation.

호작용에 의한 총광합성 속도를 추정하기 위하여 각각의 모형식을 곱한 후 모수들을 다시 추정하였던 바

$$\begin{aligned} \text{GPR} = & 56.046(1 - 4.194\exp(-0.226 \cdot T)) \cdot L / \\ & (253.99 + L) \cdot C / (373.66 + C) \cdot 1 / \\ & (1 + 5.345\exp(-0.423 \cdot N)), \end{aligned}$$

의 모형식을 얻었는데(Fig. 11), 이때 T, L, C, N는 각각 온도(°C), PPF($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), CO₂ 농도($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), 그리고 엽중질소 함량(%)이다.

Literature cited

1. Acock, B., M. C. Acock, and D. Pasternak. 1990. Interactions of CO₂ enrichment and temperature on

carbohydrate production and accumulation in muskmelon leaves. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 115:525-529.

2. Boote, K. J., R. N. Gallaher, W. K. Robertson, K. Hinson, and L. C. Hammond. 1978. Effect foliar fertilization on photosynthesis, leaf nutrition, and yield of soybeans. *Agron. J.* 70:787-791.

3. Challa, H. 1976. An analysis of the diurnal course of growth, carbon dioxide exchange and carbohydrate reserve content of cucumber. *Agric. Res. Report* 861. Wageningen.

4. Hand, D. W. 1984. Crop responses to winter and summer CO₂ enrichment. *Acta Hort.* 162: 45-62.

5. Kitroongruang, N., S. Jodo, S. Hisai, and M. Kato. 1992. Photosynthetic characteristics of melon grown under high temperature. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 61:107-114.

6. Klueter, H. H., W. A. Bailey, P. N. Bolton, and D. T. Krizek. 1973. Light and Temperature for maximum photosynthesis in a cucumber leaf. *Trans. ASAE.* 16:142-144.

7. Lim, J. T., G. G. Wilkerson, C. David Raper, Jr., and H. J. Gold. 1990. A dynamic growth model of vegetative soyabean plants : Model structure and behaviour under varying root temperature and nitrogen concentration. *J. Exp. Bot.* 41: 229-241.

8. Lugg, D. G. and T. R. Sinclair. 1981. Seasonal changes in photosynthesis of field - grown soybean leaflets. 2. Relation to nitrogen content. *Photosynthetica* 15:138-144.

9. Peet, M. M., S. C. Huber and D. T. Patterson. 1986. Acclimation to high CO₂ in monoecious cucumbers. II. Carbon exchange rate, enzyme activities, starch and nutrient concentrations. *Plant Physiol.* 80:63-67.

10. Peet, M. M. and D. H. Willits. 1987. Greenhouse CO₂ enrichment alternatives : Effects of increasing concentration or duration of enrichment on cucumber yields. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 112:236-241.

11. Pharr, D. M., S. C. Huber and H. N. Sox. 1985. Leaf carbohydrate status enzymes of translocate synthesis in fruiting and vegetative plants of *Cucumis sativus* L. *Plant Physiol.* 77:104-108.

12. Robbins, N. S. and D. M. Pharr. 1987. Regulation of photosynthetic carbon metabolism in cucumber by light intensity and photosynthetic period. *Plant Physiol.* 85:592-597.

13. Tolley-Henry, L. C. and C. D. Raper, Jr. 1986. Nitrogen and dry matter partitioning in soybean plants during onset of and recovery from nitrogen stress. *Bot. Gaz.* 147:392-399.

임준택 · 백선영 · 정현희 · 현규환 · 권병선 · 김학진 · 정순주 · 이범선

광도, 온도, CO₂ 농도 및 엽중 질소농도의 변화에 따른 양액재배 오이의 광합성속도에 관한 수리적 모형

임준택* · 백선영 · 정현희 · 현규환 · 권병선 · 김학진 · 정순주¹ · 이범선¹
순천대학교 자원식물개발학과 · 전남대학교 응용식물학부 시설원예학교실¹

적 요

시설 오이재배에서 조절가능한 환경요인들, 즉 광도, CO₂ 농도, 온도 그리고 엽중 질소 농도의 변화에 따른 양액재배 오이 엽의 총광합성 속도를 측정하였다. 광보상점은 10~20 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 정도로 낮았고 광포화점은 1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상이였으며, 오이의 총광합성 속도는 온도가 상승할수록 증가속도는 감소하지만 지속적인 증가를 보였으나 24~32°C 사이에서 광합성 속도는 큰 차이를 보이지 않아 이 범위가 오이 생육에 대한 적정온도인 것으로 나타났다. CO₂ 보상점은 20-40 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 사이에 위치하였고 CO₂ 포화점은 1200 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 이상으로 나타났으며 엽중 질소함량의 증가에 따른 잎의 총광합성 속도의 변화는 sigmoid 형의 증가추세를 보였다. 요인들간의 상호작용 효과에서는 모든 경우 상승적으로 나타나, 한 요인의 수준이 증가함에 따라 타 요인의 수준의 증가에 따른 총광합성 속도도 상승적으로 증가하였다. 각 환경요인의 변화와 요인들간의 상호작용에 따른 총광합성 속도의 변화에 대한 수리적 모형을 개발하였다. 이들 모형은 시설 내 환경변이에 따른 오이의 생육 내지는 수량에서의 차이를 밝히는데 이용될 수 있으며 오이의 식물생장 모형이나 더 나아가 경영합리화를 위한 오이 생산 전문가 시스템의 개발에 필요한 기초 자료로 이용될 수 있을 것이다.

주제어 : *Cucumis sativus* L., 총광합성 속도, 양액재배, 광, CO₂, 온도, 엽중질소함량, 총광합성 속도의 수리적 모형, GPR, PPF