

폐쇄형 식물 생산시스템내의 광합성효율 모델 개발
Development of Photosynthesis Efficiency Model
in the Closed Plant Production System

김기성* · 김문기

서울대학교 농업생명과학대학 농공학과

Kim, K.S.* · Kim, M.K.

Department of Agricultural Eng., Seoul National Univ., Suwon, 441-744

서론

폐쇄형 식물 생산 시스템에서 생산되는 식물은 성장속도가 빠르기 때문에 성장속도를 제어하거나 예측할 수 없어 수확적기를 놓치면 품질이 현저히 떨어져 상품성이 저하된다. 이를 해결하기 위해서는 식물생장기간 동안 식물에 따라 적절한 성장환경을 조성하여 성장정도를 균일하게 할 수 있는 최적 환경제어가 필요하다.

본 연구에서는 폐쇄형 식물 생산시스템의 최적 환경제어를 위하여 엽록소형광분석법을 이용하여 상추를 중심으로 광합성효율 모델(photosynthesis efficiency model ; PEM)을 개발하였다.

재료 및 방법

식물의 생장에 영향을 미치는 주요 환경요인은 기온, 광합성 유효 광량자속밀도, 상대습도, CO₂농도, 기류속도, 배양액 온도 등이며 이들 환경요인의 변화와 식물의 생체변화를 정량화하기 위하여 온·습도 조절이 가능한 식물생장상 내부에 박막수경(NFT)방식의 재배시스템을 설치하고 재배기간이 짧은 적축면상추(*lactuca sativa* L.)를 재배하여 실험하였다. 실험에 이용된 폐쇄형 식물 생산시스템의 크기는 가로 210 cm, 세로 110 cm, 높이 220 cm 이며 식물재배공간은 가로 140 cm, 세로 100 cm, 높이가 140 cm 이다. 폐쇄형 식물 생산 시스템 내부의 CO₂농도는 미세 조절기가 부착된 액화탄산가스를 이용하여 조절하고 내부의 기류속도는 내부에 설치된 팬을 이용하여 조절하였다.

실험에 사용된 광원으로 형광램프(fluorescent lamp) 12개, 고압나트륨램프(high pressure sodium lamp) 4개, 수은램프(high pressure mercury vapor lamp) 4개를 사용하였다. 환경변화와 식물과의 관계를 파악하기 위하여 폐쇄형 식물 생산시스템 내부의 환경변화에 따른 상추의 엽록소형광을 측정하였다.

결과 및 고찰

가. 환경변화와 광합성효율

F_v'/F_m' 은 그 환경조건에서의 광화학수율(photochemical yield)을 나타내며 광합성효율을 의미한다. F_v'/F_m' 값이 크면 클수록 광합성효율은 좋은 것이다. Fig. 1은 폐쇄형 식물 생산시스템 내부의 상추에서 측정된 F_v'/F_m' 과 기온과의 관계이고 광합성효율이 우수한 엽온의 범위는 17℃~27℃로 추정되었고 F_v'/F_m' 이 최적인 값은 0.723이고 그 범위는 21~23℃로 추정되었다. Fig. 2는 광합성효율과 PPFD의 관계를 나타낸 것이며 광합성효율도 PPFD가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 CO₂농도와 광합성효율과의 관계이며 CO₂농도가 860~1800ppm 범위에서 광합성효율이 좋은 것으로 나타났으며 F_v'/F_m' 이 최적인 값은 0.719이고 그 범위는 1240~1410 ppm으로 추정된다. Fig. 4와 같이 광합성효율이 비교적 좋은 상대습도 범위는 40~90%이다.

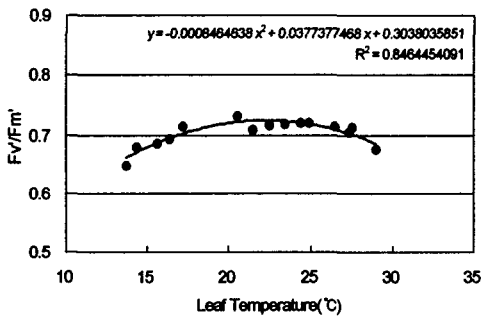


Fig. 1 Relationship between F_v'/F_m' and ambient temperature

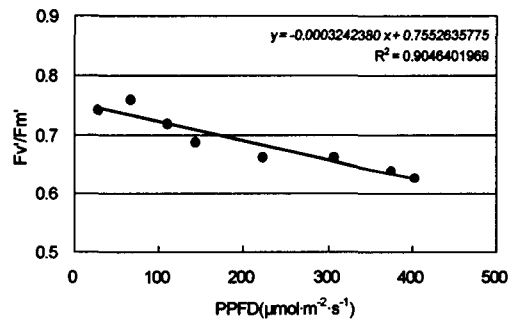


Fig. 2 Relationship between F_v'/F_m' and PPFD

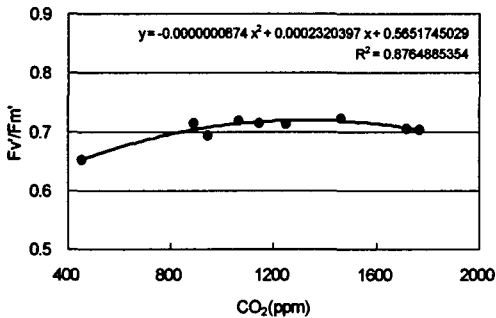


Fig. 3 Relationship between F_v'/F_m' and CO₂

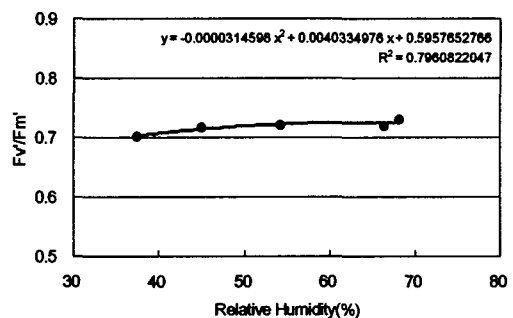


Fig. 4 Relationship between F_v'/F_m' and relative humidity

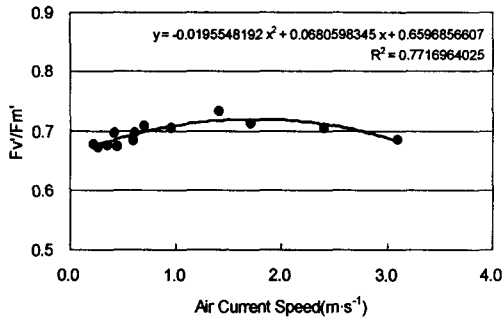


Fig. 5 Relationship between F_v'/F_m' and air current speed

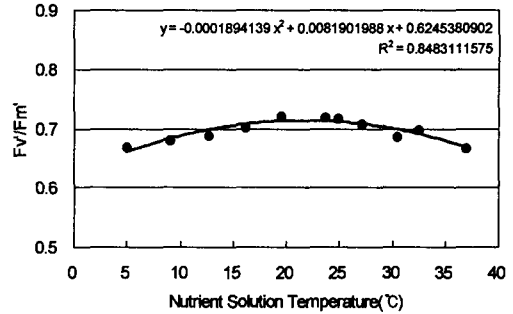


Fig. 6 Relationship between F_v'/F_m' and nutrient solution temperature

F_v'/F_m' 이 최적인 값은 0.725이고 그 범위는 60~65%인 것으로 추정된다. Fig. 5는 기류속도와 광합성효율과의 관계이며 광합성효율이 비교적 우수한 범위는 $0.8 \sim 2.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 매우 넓은 범위이다. 광합성효율이 최적인 값은 0.721이고 그 범위는 $1.6 \sim 1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 추정된다. Fig. 6은 배양액 온도와 광합성효율과의 관계이며 광합성효율이 우수한 범위는 $13 \sim 29^\circ\text{C}$ 이다. 광합성효율이 최적인 값은 0.713이고 그 범위는 $20 \sim 23^\circ\text{C}$ 로 추정된다.

나. 광합성효율 모델 (photosynthesis efficiency model : PEM)

광합성 중에 측정된 300개의 F_v'/F_m' 자료로부터 광합성효율에 영향을 미치는 환경요인 간의 상관관계를 파악하기 위하여 주성분분석(SAS V8.01)을 하였다. 다중회귀 모형의 유의성을 검정하기 위하여 F-검정을 하면 검정통계량의 p-값이 0.0001로 유의수준 5%보다 상당히 작으므로 6개의 환경요인 변수를 포함한 다중회귀 모형이 광합성효율을 설명하는데 유의함을 알 수 있다. 이다. Table 1은 공분산행렬에 의해서 구해진 고유값이다.

Table 1 Eigenvectors of measurement data(F_v / F_m)

Item	PRIN1	PRIN2	PRIN3	PRIN4	PRIN5	PRIN6
T_A	0.494630	0.305430	0.342539	-0.067036	0.197954	-0.707843
T_N	0.413848	0.261297	-0.365086	0.697587	0.288165	0.239790
CO_2	0.231897	-0.567929	0.667914	0.245861	0.204798	0.274194
V_A	-0.487414	-0.249482	-0.170818	0.101464	0.741423	-0.333173
PPFD	-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

T_A : Ambient Temperature T_N : Nutrient Solution Temperature CO_2 : CO_2 Concentration

V_A : Air Current Speed PPFD : Photosynthesis Photon Flux Density RH : Relative Humidity

Table 1의 결과에서 여섯 가지 주성분을 이용하여 광합성효율 모델을 구성하고 실측치와 예측치를 비교하여 첫 번째 주성분을 선택하였다.

$$f(T_A) = -0.0008464638(T_A)^2 + 0.0377377468(T_A) + 0.3038035851 \quad (1)$$

$$f(T_N) = -0.0001894139(T_N)^2 + 0.0081901988(T_N) + 0.6245380902 \quad (2)$$

$$f(CO_2) = -0.0000000874(CO_2)^2 - 0.0002320397(CO_2) + 0.5651745029 \quad (3)$$

$$f(V_A) = -0.0209990206(V_A)^2 + 0.073088199(V_A) + 0.6577742683 \quad (4)$$

$$f(PPFD) = -0.0000324238(PPFD) + 0.7552635775 \quad (5)$$

$$f(RH) = -0.0000314598(RH)^2 + 0.0040334976(RH) + 0.5957652766 \quad (6)$$

$$Y_{PEM} = 0.49463f(T_A) + 0.413848f(T_N) + 0.231897f(CO_2) - 0.487414f(V_A) - 0.29012f(PPFD) + 0.456676f(RH) + 0.06 \quad (7)$$

식 (7)에서 Y_{PEM} 는 F_v / F_m 값이다. Fig. 7은 측정값과 식(7)을 이용하여 예측한 값을 비교한 것이다. 검증에 사용된 실험 자료는 모델개발에 이용된 자료와 다른 40 개의 자료를 이용하였다. 실험에서 측정된 F_v / F_m 과 광합성효율 모델에 의해서 예측된 값과의 오차는 0~5.8%이며 평균은 2.5%였다.

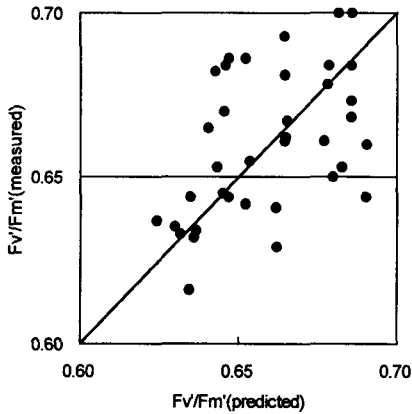


Fig. 7 Comparison of measured and predicted F_v/F_m

환경 모니터링 시스템과 최적제어 시스템에 적용하여 식물생체정보를 이용한 경제적인 최적 환경제어 시스템의 개발이 가능할 것으로 생각된다.

요약 및 결론

적축면상추의 광합성효율이 최적인 환경조건은 엽온은 21~23℃, CO₂는 1270~1460 ppm, 상대습도는 60~65%, 기류속도는 1.6~1.9 m · s⁻¹, 배양액온도는 20~23℃이었으며 PPFD가 증가할수록 광합성효율은 감소하였고 광합성 시작 후 6시간이 경과하면 광합성 효율이 감소하기 시작하였다. 이상의 연구 결과로부터 광합성 효율 모델을 이용하여 식물생산시설의

인용문헌

1. 정병철, 이춘환. 2000. 엽록소 형광을 이용한 광합성 연구. *Bioware*,2(12). [online]. http://bric.postech.ac.kr/webzine/content/review/plantbio/dec/lee12_index.pdf
2. Govindjee 1995. Sixty-three years since Kautsky: Chlorophyll a fluorescence. *Aust. J. Plant Physiol.* 22:131-160.
3. Haitz, M., 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.
4. Krause, G. H., Verrotte, C. and Briantais, J, M. 1982. Photoinduced quenching of chlorophyll fluorescence in intact chloroplasts and algae. Resolution into two components. *Biochim. Biophys. Acta* 670:116.
5. Krause, G. H., Weis, E. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The Basics. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42:313-349.
6. Krause, G. H., Weis, E. 1984. Chlorophyll fluorescence as a tool in plant physiology. II. Interpretation of fluorescence signals. *Photon. Res.* 5:139-157.