

플러그묘 個體群의 純光合成速度 測定

Measurement of Net Photosynthetic Rate in the Plug Stand

김 용 현* 古在豊樹**

정희원

Y. H. Kim

T. Kozai

ABSTRACT

Two methods were used to determine the net photosynthetic rate(NPR) in the plug stand using a wind tunnel for plug seedlings production. One is called as the integration method in which NPR calculated by the use of air current speed and CO₂ concentration measured at any heights above the medium surface in a wind tunnel were summed. It was assumed that the air flow at any layer did not mix with the lower or upper air layer. The other is called as the diffusion method in which eddy diffusivities above the plug stand were used to determine the NPR in the plug stand. In this method, CO₂ above or inside the plug stand was assumed to be absorbed vertically. NPR determined by the diffusion method was 28~45% of the NPR calculated by the integration method. Considering the magnitude of NPR and the effects of the air current speed on NPR, the integration method would be adequate for the calculation of NPR in the plug stand. Maximum NPR determined using the integration method appeared at the air current speed of 0.7m s⁻¹. It was ascribed to the decreased diffusion resistances of CO₂ with the increasing air current speed. NPR at the rear region in plug stand was 20~34% lower than that at the front region. NPR sharply decreased with the increase of an elapsed time after the beginning of photoperiod. Therefore CO₂ enrichment would be effective to force the growth of plug seedlings in a semi-closed ecological system under artificial lighting.

주요용어(Key Words): 순광합성속도(Net Photosynthetic Rate), 적산법(Integration Method), 플러그묘 개체군(Plug Stand), 확산법(Diffusion Method), 풍동(Wind Tunnel)

1. 서 론

식물생산 시스템에서 환경제어의 목적은 식물의 광합성 능력을 최대로 유지시키면서 식물생산에 적합하도록 물리, 화학 또는 생물학적 환경요소를 적절하게 조성하는 데 있다. 식물의 광합성 속도는 광강도 뿐만 아니라 대기중의 CO₂ 농도, 기류속도, 상대습도 등 광이외의 환경요소에 의해서도 크게 변화된다. 대기중의 CO₂ 농도는 확산에 의해서 여러 경로를 거치면서 엽내의 엽록체(chloroplast)까지 전달

된다. 광합성을 CO₂ 확산 현상으로서 해석하려면 기류속도, 기온, 상대습도, CO₂ 농도 등과 같은 미기상 환경요소가 CO₂ 확산에 미치는 영향이 먼저 구명되어야 한다.

최근들어 묘생산의 省力化가 용이한 플러그묘의 이용이 계속 증가하고 있는 가운데 품질이 균일한 묘를 생산하는 데 있어서 적정 환경제어기술의 확립에 대한 관심이 증대되고 있다. 플러그묘의 생장을 제어하여 품질이 균일한 묘를 생산하려면 플러그묘 個體群(이하 '묘개체군'이라 칭함)에 대한 생장해석

* 전북대학교 농과대학 농업기계공학과

** 日本 千葉大學 園藝學部 生物生産科學科 環境調節工學研究室

이 시도되어야 한다. 金과 古在^{2),5)}, Kim 등⁶⁾은 인공 광하에서 품질이 균일한 플러그묘의 대량생산 시스템 설계에 유용한 기초 자료를 제공할 것으로 생각되는 실험을 수행한 바 있다. 즉, 인공광하에서 기류 속도 제어가 가능한 플러그묘 육묘용 풍동을 제작하고^{2),5),7)} 플러그묘의 생육단계에 따라 개체군 내외에서 측정된 기류속도를 이용하여 묘 개체군상의 공기역학적 특성을 구명하였다³⁾. 또한 0.3~0.9 m s⁻¹의 범위에서 기류속도를 조절하면서 기류속도의 변화가 묘개체군 내외에서의 기온, 상대습도, 포차, CO₂ 농도 분포 등에 미치는 영향을 검토한 바 있다^{4),8)}.

이제까지 單葉의 광합성 또는 호흡속도를 측정하기 위한 시도는 오래전부터 이루어져 왔으나, 플러그묘와 같이 초장이 작은 식물개체군의 광합성 속도를 측정하기 위한 시도는 전무한 실정이다. 식물의 乾物生長 즉 乾物重의 증가는 광합성 산물의 축적에 의해서 이루어진다. 한편 大氣와 植物葉內 엽록체와 CO₂ 교환은 광합성 또는 호흡에 의해서 이루어진다. 單葉 또는 식물 개체군의 CO₂ 교환속도를 측정할 때 여러가지 방법이 사용될 수 있으나, 실험목적 또는 대상 식물체의 종류에 따라 적절한 측정법을 선택하는 것이 중요하다. 식물 개체군의 광합성 또는 호흡속도를 결정할 때 개체별로 측정된 광합성 또는 호흡속도에 기초하여 전체 개체군의 광합성 속도를 계산하게 되면 이 과정에 커다란 측정오차가 포함될 수 있다. 왜냐하면 식물개체군은 식물개체에 의해서 구성되나 개체군의 성질 또는 기능은 개체의 그것과 전혀 다른 성질을 갖기 때문이다. 즉 식물이 집단 상태를 이루어 개체군을 형성할 경우 개체군내의 온도, 광, CO₂ 농도 등과 같은 환경조건은 개체군 외부에서의 환경조건과 다르게 된다. 그러므로 식물개체군의 광합성 속도를 측정할 때 개체군 내부 및 외부에서의 기류속도와 CO₂ 농도 분포를 고려하는 것이 바람직하다. 미기상 환경요소가 묘개체군의 생장에 미치는 효과 분석에 선행하여 시도된 본 연구에서는 플러그묘 육묘용 풍동내의 기류속도 및 CO₂ 농도 분포에 기초한 묘개체군의 純光合成速度 측정 및 특성에 대해서 보고한다.

2. 재료 및 방법

가. 광합성 측정

식물개체군의 광합성 속도를 同化箱法으로 측정하려면 개체군 형성에 적지 않은 시간이 소요될 뿐만 아니라 개체군을 수용할만한 커다란 설비가 요구되므로 측정에 많은 어려움이 따르게 된다. 본 연구에서 묘개체군의 순광합성 속도는 金과 古在²⁾가 제작한 플러그묘 육묘용 풍동내에서 배지표면 위의 높이별 기류속도 및 CO₂ 농도 분포에 따라 계산된 각 층별 순광합성 속도를 적산하여 묘개체군의 순광합성 속도를 결정한 積算法과 묘개체군 위에서의 확산계수를 이용한 擴散係數 利用法에 의해서 결정되었다.

1) 적 산 법

적산법의 사용에 따른 가정은 다음과 같다. 즉 풍동내에서 배지표면 위의 일정 높이를 흐르는 기류는 인접한 상층 또는 하층의 기류와 혼합이 이루어지지 않는다. 또한 기류의 진행방향을 따라 CO₂ 농도가 감소되므로 감소된 CO₂ 농도는 모두 묘개체군에 의해서 흡수된다. 이러한 가정하에 광합성속도 결정에 사용된 식은 다음과 같다.

$$P_n = k_1 \sum_{i=1}^n \frac{(C_{in} - C_{out})_i}{A} V_i \frac{273.15}{273.15 + t} \frac{P}{1,013} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, P_n: 순광합성 속도(mgCO₂ dm⁻² hr⁻¹), k₁: 단위환산계수, C_{in}: 입구측의 CO₂ 농도(μmol mol⁻¹), C_{out}: 출구측의 CO₂ 농도(μmol mol⁻¹), V: 풍량(cm³ sec⁻¹), A: 육묘상자의 면적(cm²), t: 기온(°C), P: 기압(mb)이다. 식 (1)에서 단위환산계수 k₁은 0°C, 1기압에서 0.0446의 값을 갖는다. i는 배지표면으로부터 시작되는 기류속도 및 CO₂ 농도 측정지점에 해당된다.

2) 확산계수 이용법

대기로부터 묘개체군내로 CO₂의 확산이 이루어질 때 광합성 속도는 다음과 같이 표시된다.

$$P_n = k_2 D_{CO_2} \frac{dC_{CO_2}}{dh} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, k₂: 단위 확산계수(=7,071.4), D_{CO₂}: CO₂ 분자의 확산계수(m² s⁻¹), C_{CO₂}: 임의의 측정높이에서의 CO₂ 농도(μmol mol⁻¹), h: 측정높이(cm)이다. 식(2)에서 CO₂ 분자의 확산계수를 묘개체군 위에서 공기의 확산계수와 동일한 것으로 가정하였으며, 이때 金과 古在³⁾, Kim 등⁷⁾에 의해서 제시된 확산계수가 적용되었다. 한편, 임의의 측정높이에서 CO₂ 농도 기울기에 해당되는 dC_{CO₂}/dh 대신에 묘개체군 내에서 CO₂ 농도차가 최대로 나타나는 경우의 평균 기울기가 사용되었으며, 묘개체군에 의한 CO₂ 흡수는 수직방향으로 이루어지는 것으로 가정하여 광합성 속도가 결정되었다.

나. 측정 항목 및 방법

기류제어 및 개체군의 공기역학적 특성에 관한 실험은 실내온도와 상대습도가 각각 22 ± 0.5℃, 65 ± 5%로 유지되는 대형 growth chamber 내에서 이루어졌다. 공시식물로서 사용된 가지(*Solanum melongna* L.)의 플러그모는 播種後 15일간의 육묘기간 동안 2매의 本葉을 갖는 플러그모로 육성되었다. 실험 개시일에 플러그모의 평균초장과 엽면적지수는 각각 52 mm 및 0.5 이었다. 실험기간 동안 배지표면에서 光合成光量子束密度(photosynthetic photon flux density)의 평균값은 300 ± 8 μmol m⁻² s⁻¹로 나타났으며, 明期和 暗期는 각각 16시간 및 8시간 이었다.

기류속도는 육묘상자의 배지 표면으로부터 18 cm 떨어진 높이에서 0.3, 0.5, 0.7 및 0.9m s⁻¹의 4수준으로 설정된 가운데 열선풍속계(Kanomax, 6071)에 의해서 측정되었다. 기류속도의 측정 부위는 정류장치의 출구로부터 각각 0.3, 0.8 및 1.3 m 떨어진 지점에서 배지 표면위 3 cm 부터 27 cm까지 3 cm 간격의 높이에 해당된다.

정류장치의 출구로부터 각각 0.3, 0.8 및 1.3 m 떨어진 지점은 각각 생육실의 前部, 中央部 및 後部に 해당된다. CO₂ 농도는 실험개시후 0, 5, 10일째에 明期 시작후 각각 0, 4, 8, 12시간에 정류장치의 출구로부터 각각 0.8 및 1.3 m 떨어진 지점으로서 배지 표면위 3 cm부터 12 cm까지 3 cm 간격의 높이에서 측정되었다. 또한 정류장치의 출구로부터 0.3 m 떨어진 지점의 배지 표면위 15 cm 높이에서 생육실의 입구측 CO₂ 농도가 측정되었다. 그림 1은 CO₂ 농도 측정의 개략도로서 임의의 측정 높이에 설치된 직경 2 mm의 알루미늄 파이프와 실리콘튜브로서 sampling된 공기는 3방향 전자밸브와 유량계를 통하여 광합성 측정시스템(LI-COR, LI-6200) 내로 들어가 적외선 분석기에 의해서 CO₂ 농도가 측정되었다.

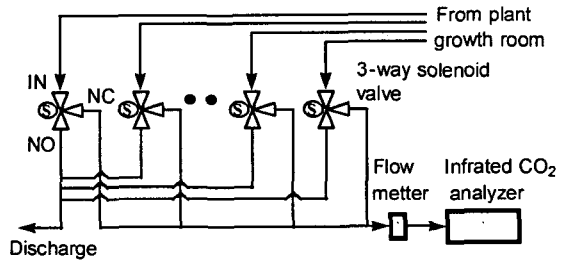


Fig. 1 Schematic diagram for the measurement of CO₂ concentration in the plug stand.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 생육실 내의 前部和 後部에서 CO₂ 농도의 수직 분포를 나타낸 것이다. 생육실 입구에서 약 310 μmol mol⁻¹ 인 CO₂ 농도가 생육실 中央部에서는 295~306 μmol mol⁻¹, 후부에서는 281~299 μmol mol⁻¹ 를 나타냈다. 일정한 높이에서 생육실 입구와 중앙부에서의 CO₂ 농도차, 생육실 중앙부와 후부에서의 CO₂ 농도차는 각각의 높이에서 생육실 전부와 후부에 위치한 묘개체군에 의해서 흡수된 CO₂ 농도를 의미한다. 플러그모의 생육 단계에 따라 다소 차이가 있기는 하나, 생육실의 중앙부와 후부

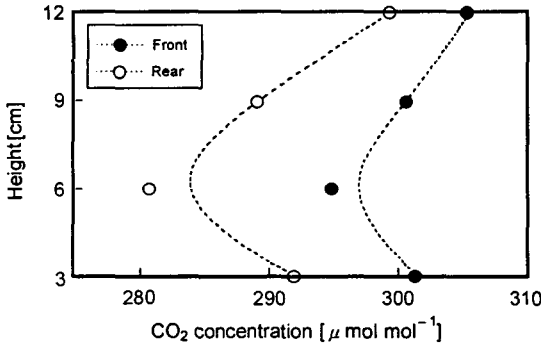


Fig. 2 Profiles of carbon dioxide at the front and rear region in the plant growth room.

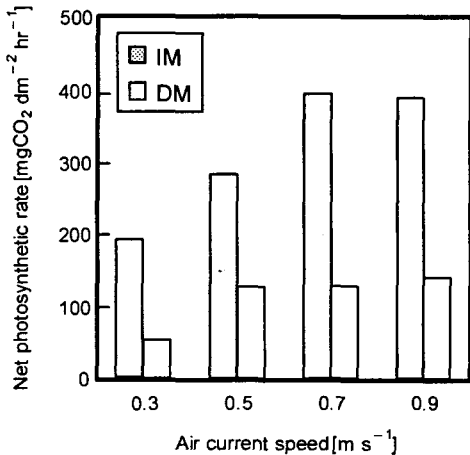


Fig. 3 Comparison of the net photosynthetic rates determined by the integration method(IM) and diffusion method(DM) at LAI of 1.4.

에서 CO₂ 농도의 최저치는 보통 묘개체군의 평균 초장 부근 또는 그 이하에서 나타났다.

실험 개시후 5일째에 식(1)과 식(2)에 의해서 결정된 묘개체군의 순광합성 속도가 그림 3에 실려 있다. 그림 3의 순광합성속도는 明期 개시후 4회 측정된 광합성 속도의 평균치에 해당된다. 확산계수를 이용하여 결정된 순광합성 속도는 적산법으로 결정된 순광합성 속도의 28~45% 정도인 것으로 나타났다. 이와같은 차이는 氣流의 진행방향을 따라 CO₂가

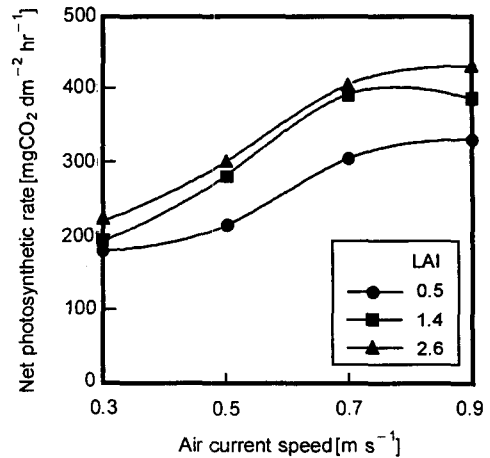


Fig. 4 Net photosynthetic rates determined by the integration method as affected by the air current speed and the growth stages of plug stand (their leaf area index, LAI).

흡수되는 적산법과 CO₂ 흡수가 수직방향으로 이루어지는 것으로 가정하여 결정된 확산계수 이용법에 기인된 것이다. 묘개체군의 순광합성 속도와 광합성 능력에 미치는 기류속도의 영향을 고려할 때 묘개체군의 순광합성 속도 결정에 적산법의 적용이 효과적인 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 적산법에 의한 묘개체군의 광합성 능력을 살펴보았다. 그림 4는 생육단계에 따라 순광합성속도에 미치는 기류속도의 효과를 나타낸 것이다. 그림 4에서 엽면적지수 0.5, 1.4 및 2.6은 각각 실험 개시후 0, 5 및 10일째에 해당되는 것이다. 기류속도가 0.7 m s⁻¹에 이르기까지 기류속도의 증가에 따라 순광합성 속도가 증가하였으나, 그 이후에는 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 기류속도의 증가에 따라 엽면경계층의 두께와 확산저항이 감소하여 CO₂ 확산이 보다 용이하게 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 기류속도가 0.7 m s⁻¹ 이상일 경우 확산저항은 감소되나 동시에 엽면으로부터의 증산속도가 증대되어 엽내의 수분함유량은 줄어들게 된다. 그 결과 기공개도가 작아지면서 기공확산 저항은 증가하고 순광합성 속도는 감소한다. 이와 같이 기류속도는

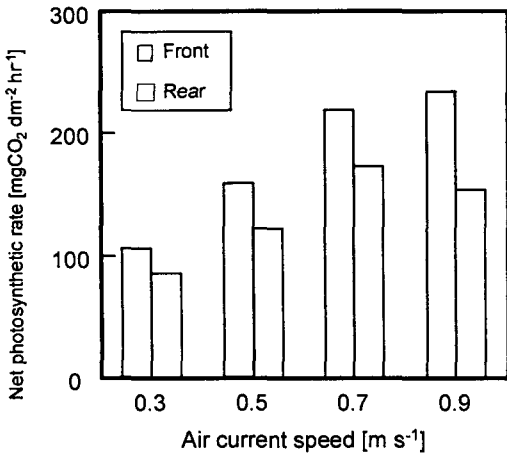


Fig. 5 Comparison of the net photosynthetic rates as affected by the air current speed at the front and rear region in the plant growth room at LAI of 1.4.

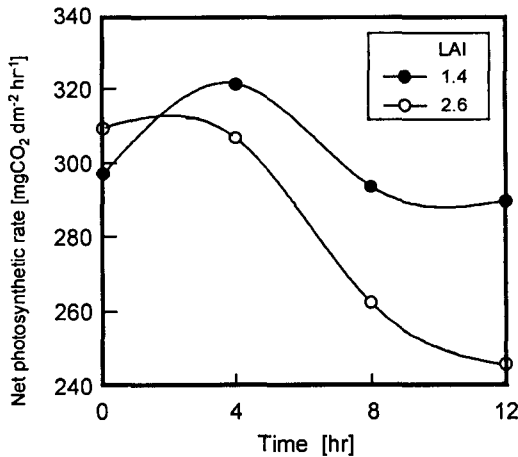


Fig. 6 Variations of net photosynthetic rates as affected by the elapsed time after photoperiod and the plant growth stages (their leaf area index, LAI) at air current speed of 0.5 m s⁻¹.

엽면경계층을 매개로 하여 묘개체군의 순광합성 속도 뿐만 아니라 증산속도의 변화에 커다란 영향을 미치게 된다.

생육실의 위치에 따른 순광합성 속도가 그림 5에 실려 있다. 생육실 後部에서의 순광합성 속도는 前部の 경우에 비해서 20~34% 작게 나타났다. 이전에 발표된 金과 古在(1996)의 연구 결과에서 생육실 후부에서의 공기역학적 저항과 확산계수는 전부의 그것에 비해서 각각 평균 25%, 15% 작게 나타났음을 감안할 때 전부에서의 순광합성 속도에 대한 후부에서의 감소는 유의한 결과로 해석된다. 그림 6은 CO₂ 施用이 이루어지지 않은 가운데 明期 개시후 4시간 간격으로 측정된 묘개체군의 순광합성 속도를 나타낸 것이다. 엽면적지수가 1.4를 나타낸 시기, 즉 실험 개시후 5일째에서 순광합성 속도는 명기 개시와 더불어 증가되고 명기 개시후 4시간이 경과된 시점에서 최고치를 나타내었다. 한편, 실험 개시후 10일이 경과되었을 때 묘개체군의 최고 순광합성 속도는 명기 개시와 더불어 나타나나, 그 이후에는 급격하게 감소하였다. 이러한 결과는 명기 개시후 묘개체군의 일정 높이에서 측정된 CO₂ 농도의 변화와 관계가 있다. 묘개체군의 평균 초장 부근에서 측정된 CO₂ 농도를 살펴보면, 明期 개시와 더불어 CO₂ 농도는 급격하게 감소되어 4시간 경과후 대기 수준의 CO₂ 농도를 나타내었다. 이후 CO₂ 농도가 지속적으로 감소하면서 12시간 경과 후에는 160~190 μmol mol⁻¹의 낮은 수준에 도달하였다. 이러한 환경 조건에서 엽내로의 CO₂ 확산속도가 매우 작게 된다. 그러므로 인공광하의 반폐쇄 또는 폐쇄 생태계에서 식물의 생장을 촉진하려면 CO₂ 施用이 유효할 것으로 판단된다.

4. 결 론

플러그묘 개체군의 광합성 속도를 결정하고자 묘개체군 내외에서의 기류속도 및 CO₂ 농도를 측정하였다. 묘개체군 위의 확산계수를 이용하여 결정된 순광합성 속도는 적산법에 의해서 결정된 순광합성 속도의 28~45% 정도인 것으로 나타났다. 묘개체군의 순광합성 속도와 광합성 능력에 미치는 기류속도의 영향을 고려할 때 묘개체군의 순광합성 속도 결정에 적산법의 적용이 효과적일 것으로 판단된다.

기류속도가 순광합성속에 미치는 효과로서 0.7 m s^{-1} 에 이르기까지 기류속도의 증가에 따라 순광합성속도가 증가하였는 데, 이것은 기류속도의 증가에 따라 확산저항이 감소되어 CO_2 확산이 보다 용이하게 이루어졌기 때문이다. 생육실 後部에서의 순광합성속도는 前部の 경우에 비해서 20~34 % 작게 나타났다. 묘개체군의 생육이 진행될수록 明期 개시후 순광합성 속도가 급격하게 감소하였는 데, 이것은 생육실내에서 CO_2 농도의 감소에 따라 CO_2 확산속도가 저하되었기 때문이다. 그러므로 인공광하의 반폐쇄 또는 폐쇄생태계에서 식물의 성장을 촉진하고자 할 때 CO_2 施用이 유효할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 金容顯, 古在豊樹. 1997. 플러그묘 個體群의 純光合成速度 測定. 한국농업기계학회 1997년 동계 학술대회 논문집 2(1):276-281.
2. 金容顯, 古在豊樹. 1996. 人工光下の 工程育苗用 風洞 設計 및 工程苗 個體群上の 空氣力學的 特性. 한국농업기계학회지 21(4):429-435.
3. 金容顯, 古在豊樹. 1996. 人工光下에서 工程苗 個體群上の 空氣力學的 抵抗 및 擴散係數. 한국생물생산시설환경학회지 5(2):159-159.
4. 金容顯, 古在豊樹. 1996. 氣流速度가 人工光下에서 工程育苗 個體群上の 微氣象에 미치는 影響. 한국생물생산시설환경학회지 5(2):160-166.
5. 金容顯, 古在豊樹, 久保田智惠利, 北宅善昭. 1996. 人工光下におけるセル成型苗生産のための 風洞設計. 日本植物工場學會平成8年度大會 學術講演要旨集 pp.29-30.
6. 牛島忠廣, 古川昭雄, 米山忠克. 1981. 植物生産 過程測定法. 共立出版株式會社 pp.100-126.
7. Kim, Y. H., T. Kozai, Y. Kitaya and C. Kubota. 1996. Design of a wind tunnel for plug seedlings production under artificial lighting. Acta. Hort. 440:153-158.
8. Kim, Y. H., T. Kozai, Y. Kitaya and C. Kubota. 1996. Effects of air current speed on the microclimates of the plug stand under artificial lighting. Acta. Hort. 440:153-158.