

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

金容顯 · 古在豊樹*

전북대학교 농과대학 농업기계공학과

*千葉大學 園藝學部 生物生産科學科 環境調節工學研究室

Aerodynamic Resistance and Eddy Diffusivity above the Plug Stand under Artificial Light

Kim, Y.H. and Toyoki Kozai*

Dept. of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture,
Chonbuk National University, Chonju, 561-756, Korea

*Lab. of Environmental Control Engineering, Dept. of Bioproduction Science,
Faculty of Horticulture, Chiba University, Matsudo, 271, Japan

Abstract

Experiment was performed in a newly developed wind tunnel with light system to determine the aerodynamic resistance and eddy diffusivity above the plug stand under artificial light. Maximum air temperature appeared near the top of the plug stand under artificial light. Since Richardson number was ranged from -0.07 to $+0.01$, the atmosphere above the plug stand in wind tunnel was in an unstable or near-neutral stability state.

The average aerodynamic resistance at rear region of plug stand was 25 % higher than that at middle region. Eddy diffusivity(K_M) linearly increased with the increasing air current speed. K_M at air current speed of $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ was about two times as many as that at air current speed of $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. And average K_M at the rear region was 15% lower than that at the middle region. These results indicated that the diffusion of heat and mass along the direction of air current inside the plug stand was different. It might cause the lack of uniformity in the growth and quality of plug seedlings. The wind tunnel developed in this study would be useful to investigate the effects of air current speed on microclimates and the growth of plug seedlings under artificial light in a semi-closed ecosystem.

키 워 드 : CO₂ 확산, 공정묘 개체군, 공기역학적 저항, 확산계수, 인공광, 안정성

Key words : CO₂ diffusion, plug stand, aerodynamic resistance, eddy diffusivity, artificial light, stability

緒 言

식물생산 시스템에서 환경제어의 목적은 식물의 광합성 능력을 최대로 유지시키면서 식물생산에 적합한 물리, 화학 또는 생물학적 환경요소를 조성하는 데 있다. 식물의 광합성 속도를 측정해보면 광합성속도가 단순히 광강도만에 의해서 결정되는 것이 아니고, 대기중의 CO₂ 농도, 상대습도, 기류속도 등 광이외의 환경요소에 의해서도 크게 변화됨을 알 수 있다. 광-광합성곡선은 일정한 환경 조건하에서 광강도만을 변화시키는 가운데 얻어진 광합성속도로부터 결정된다. 이와 같은 조건하에서 결정된 광-광합성속도는 단순히 광강도의 증가에 따른 광합성속도의 증대를 나타내는 것으로서, 광이외의 환경요소가 광합성속도에 미치는 영향을 설명하기에는 충분하지 못하다. 그러므로 광합성 반응과 달리 대기중의 CO₂ 농도가 엽내의 엽록체(chloroplast)로 확산되는 현상으로서 광합성을 해석하려면 CO₂ 확산에 미치는 기류속도, 기온, 상대습도, CO₂ 농도 등과 같은 미기상 환경요소의 영향이 먼저 구명되어야 한다.

식물체 옆에 광을 조사시키면 엽록체내에서 광합성반응이 일어나 엽록체내의 CO₂ 농도가 저하된다. 그 결과 대기와 엽록체내 사이에 CO₂ 농도차가 발생되어 대기중의 CO₂ 확산이 엽내로 진행된다. 이와 같은 CO₂ 확산은 난류대기로부터 물리 및 화학적 성질이 상이한 몇 개의 경로, 즉 엽면경계층(boundary layer at leaf surface), 기공(stomata), 표피(cuticle), 엽육(mesophyll)등을 통해서 엽록체내로 도달된 후 고정과정을 거치게 된다. 이러한 경로는 CO₂ 흐름에 대한 저항체로 작용하면서 CO₂ 확산속도를 제한하게 된다. CO₂ 확산속도를 계산하려면 각각의 경로에 해당되는 확산계수가 먼저 결정되어야 하나, 경로별로 구분하여 확산계수를 결정하는 것이 간단치 않다. 때문에 확산저항 모형을 가정한 후 모형에 의해서 CO₂ 확산속도를 결정하는 것이 일반적이다. 확산저항 모형에서 대기와 엽록체 사이의 CO₂ 농도차는 전기회로의 전압에 상당하며, 각각

의 경로에서의 확산저항은 전기적 저항으로 취급된다. 그림 1은 미토콘드리아에서 호흡에 의한 CO₂ 확산저항과 광호흡을 고려하지 않은 경우의 CO₂ 확산경로와 확산저항을 전기회로로 표시한 개략도이다. 그림 1의 회로에 옴(Ohm)의 법칙을 적용할 때 CO₂ 확산속도는 다음과 같이 정의된다.³⁾

$$P_0 = \frac{\phi_a - \phi_c}{\Sigma r} = \frac{\phi_a - \phi_c}{\{r_a + r_b + r_m + r_s \cdot r_c / (r_s + r_c)\}} \quad (1)$$

여기에서 p₀는 CO₂ 확산속도, φ_a 및 φ_c는 각각 대기와 엽록체내의 CO₂ 농도, Σr은 전체 확산저항, r_a는 난류대기저항, r_b는 엽면경계층저항, r_c는 표피저항, r_s는 기공저항, r_m은 엽육저항에 해당된다. 위의 확산저항은 확산경로의 구조 및 성질에 따라 다른 값을 지니며, 이 가운데 난류대기저항, 엽면경계층 저항 및 기공저항은 식물 개체군내외에서의 미기상에 따라 변화하는 가변저항에 해당된다. 식 (1)에서 CO₂ 확산속도는 식물의 순광합성속도(net photosynthetic rate)를 의미한다. 그러므로 순광합성속도를 증대시키려면 대기와 엽록체내의 CO₂ 농도차를 크게 하거나, 전체확산저항을 작게 하는 것이 바람직하다. 따라서 광합성능력이 최대로 유지되는 최적 환경조건을 설정하려면 미기상 요소의 변화에 따른 확산저항의 변동과 광합성능력의 동태를 파악하는 연구가 선행되어야 한다.

인공광하에서 공정묘개체군 (이하 '묘개체군'이라 칭함)이 균일하게 성장되려면 묘개체군내로 열 및 물질의 확산이 원활하게 이루어져야 한다. 그러므로 열 및 물질의 확산을 증대시킬 수 있는 묘개체군내 최적 환경제어 기술의 확립이 요구되나, 이에 관한 연구는 전무한 실정이다. 최근에 金등²⁾과 Kim등⁶⁾은 기류제어가 공정묘의 성장에 미치는 영향을 구명하고자 工程苗木育成用 風洞을 설계한 후 인공광하에서 묘개체군 위에서의 공기역학적 특성을 보고한 바 있다. 본 연구의 목적은 묘개체군내외에서 측정된 기온 및 기류속도 분포를 기초로 하여 열 및 운동량 교환에 의한 기

류의 安定性을 검토한 후 난류대기와 엽면경 계층저항이 포함된 공기역학적 저항과 확산계수를 분석하는 데 있다.

k : von Karman 상수 (=0.4)

d : 地面修正量 (m)

z_0 : 粗度長 (m)이다.

材料 및 方法

金등²⁾과 Kim등³⁾이 설계한 공정육묘용 풍동은 整流裝置(air flow conditioner), 송풍실, 송풍기와 송풍량 제어장치, 광원으로 구성된다. 그들은 풍동내의 생육실에 폭 0.28m, 길이 0.55m의 육묘상자(plug tray) 2개가 길이 방향으로 놓이는 것으로 상정한 후, 미국기계공학회(American Society of Mechanical Engineers, ASME)의 정류장치 설계기준⁴⁾을 이용하여 균일한 기류속도를 얻기 위한 정방형 풍동의 한번의 길이를 0.315m로 결정하였다. 또한, 정류장치의 정류파이프로써 내경 24mm, 외경 26mm, 길이 0.63m의 폴리카보네이트제 파이프가 사용되었다. 그림 2와 같이 풍동의 입구측에 위의 主整流裝置가 설치되고, 풍동의 출구측에 길이 0.1m의 補助整流裝置가 설치되었다. 생육실은 두께 5mm의 아크릴판으로 제작되었다. 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 송풍기(EF-30BSB)의 最大送風量과 靜壓은 각각 $33\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, 12.5mmAq 으로서, 排氣式으로 제작된 송풍기가 吸氣式으로 개조되어 사용되었다. 풍동내의 기류속도는 송풍기의 송풍량을 제어하는 방식에 의해서 조절되며, 육묘상자(plug tray)에 담겨있는 배지 표면으로부터 18cm 떨어진 높이에서 일정한 기류속도가 유지되도록 기류속도 제어 시스템이 구성되었다. 광원으로는 55W의 백색형광등(FPL55EX-W)이 사용되었다.

식물군락위의 기류속도 분포는 中立條件下에서 다음과 같은 對數函數로 표시된다.

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left\{ \frac{(z-d)}{z_0} \right\} \quad (2)$$

여기서, $u(z)$: 임의의 높이 z 에서 기류속도 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),

u_* : 摩擦速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

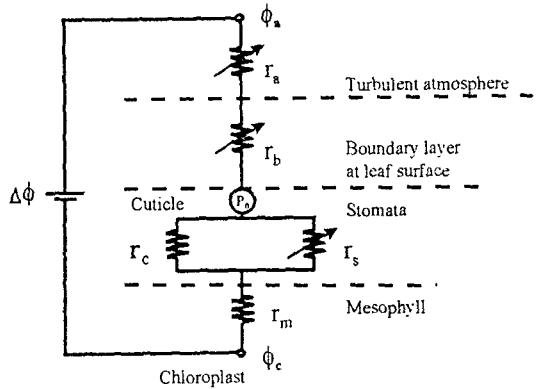


Fig. 1. Schematic diagram for CO_2 diffusion from atmosphere to chloroplast.

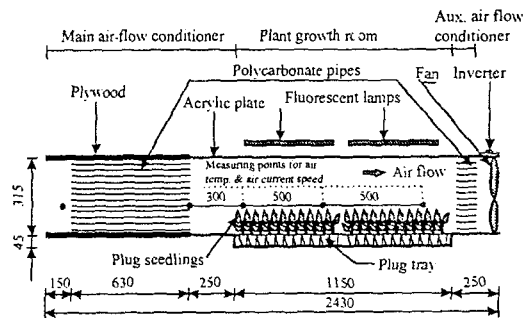


Fig. 2. Cross-sectional view of a wind tunnel [unit: mm].

기류속도와 기온의 실측치에 최소자승법을 적용하면 기류속도 분포와 관련된 모수, 즉, 地面修正量, 摩擦速度, 粗度長등이 결정된다. 기류속도의 분포에 미치는 浮力의 크기는 부력에 의해서 생성된 에너지와 난류에 의해서 消散된 에너지 比에 의해서 결정된다. 부력의 크기를 결정하는 모수로서 Richardson數(R)와 Monin Obukhov 길이(L)가 사용되는 데,

Table 1. Specifications of wind tunnel designed in this experiment.

Total size : W 315mm×H 315mm×L 2430mm

Air flow conditioner

material : Polycarbonate pipes

main pipes : ID 24mm×OD 26mm×L 630mm

auxiliary pipes : ID 24mm×OD 26mm×L 100mm

Plant growth room

material : acrylic plate (5mm thick)

size : W 315mm×H 315mm×L 1150mm

Fan & fan controller

fan : axial flow type (EF-30BSB, Mitsubishi Electric Co.)

air flow rate : 33m³ · min⁻¹

static pressure : 12.5 mmAq

fan controller : fan inverter (FS-200C, Mitsubishi Electric Co.)

Light source : fluorescent twin lamp (FPL55EX-W, Matsushita Electric Co.)

전자는 기온과 기류속도의 실측치로부터 직접 계산되며, 후자는 열과 운동량 流束의 함수로 표시된다. 무차원화된 量으로서 氣層內에서 亂流混合의 강도를 나타내는 Richardson數와 大氣의 安定度 지표로 사용되는 Monin Obukhov 길이는 다음과 같이 정의된다. Richardson數와 Monin Obukhov 길이는 대기가 안정상태의 경우 正(+), 불안정 상태의 경우 負(-)의 값을 갖는다.

$$R_i = \frac{g}{T} \frac{(T_2 - T_1)(z_2 - z_1)}{(u_2 - u_1)^2} \quad (3)$$

$$L = -\frac{\rho c_p T u_*^3}{kgC} \quad (4)$$

여기서, g: 중력가속도 (=9.81m · s⁻²),
T₁, T₂: 임의의 높이 z₁, z₂에서의
기온 (K),
ρ: 공기의 밀도 (kg · m⁻³),
c_p: 비열 (J · kg⁻¹ · K⁻¹),
C: 현열유속 (J · s⁻¹ · m⁻²)

임의의 높이 z₁과 z₂에서 顯熱流束은 다음 식으로 표시된다.

$$C = \frac{\rho c_p k^2 (u_2 - u_1)(T_1 - T_2)}{\left\{ \ln \frac{(z_2 - d)}{(z_1 - d)} \right\}^2 (\phi_H \phi_M)} \quad (5)$$

여기서, φ_H와 φ_M은 무차원화된 열 및 운동량 교환의 안정도 함수를 의미한다. 이들 안정도 함수는 Richardson數에 의해서 결정된다.

$$\phi_H = \phi_M^2 = (1 - 16R_i)^{-1/2} \quad (6)$$

대기의 안정도가 중립 또는 불안정 상태에 따라 묘개체군 위에서의 공기역학적 저항(r_a, s · m⁻¹) 및 확산계수(K_M, m² · s⁻¹)는 다음 식으로 계산된다.^{5,7,8)}

1) 중립 상태

$$r_a = \frac{\{ \ln(z-d)/z_0 \}^2}{k^2 u_*} \quad (7)$$

$$K_M = k u_* (z-d) \quad (8)$$

2) 불안정 상태

$$r_a = \frac{\{ \ln(z-d)/z_0 \} + 4.5(z-d)/L}{k u_*} \quad (9)$$

$$K_M = k u_* z (1 - 16z/L)^{1/4} \quad (10)$$

기류속도 변화에 따른 묘개체군의 공기역학적 저항 및 확산계수를 결정하기 위한 실험은 실내온도와 상대습도가 각각 $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$, $65 \pm 5\%$ 로 유지되는 대형 growth chamber 내에서 이루어졌다. 기류 속도는 육묘상자의 배지 표면으로부터 18cm 떨어진 높이에서 0.3, 0.5, 0.7 및 $0.9\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 4 수준으로 설정된 가운데, 열선풍속계(Kanomax, 6071)에 의해서 측정되었다. 기류속도의 측정 부위는 정류장치의 출구로부터 각각 0.3, 0.8 및 1.3m 떨어진 지점에서 배지 표면위 3cm 부터 27cm 까지 3cm 간격의 높이에 해당된다. 생육실내의 기온은 기류속도의 측정 지점과 동일한 위치에서 열전대(copper-constantan thermouple, ϕ 0.1mm)를 설치하여 측정하였다. 실험기간 동안 배지 표면에서 광량자센서(LI-COR, LI 190S)에 의해서 측정된 광합성광량자속밀도(photosynthetic photon flux density)의 평균값은 $300 \pm 8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 나타났다. 공시 식물로서 사용된 가지(*Solanum melongna* L.)의 공정묘는 播種後 15일간의 육묘기간 동안 2매의 本葉을 갖는 공정묘로 육성되었다. 실험개시일에 공정묘의 평균초장과 엽면적지수는 각각 52mm 및 0.5이었다.

結果 및 考察

표 2는 생육실 중앙부에서의 기류속도 및 공정묘의 초장에 따른 개체군의 공기역학적 특성을 나타낸 것이다. 기류속도가 $0.30 \sim 0.92\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 범위에서 변화될 때 지면수정량, 조도장 및 마찰속도는 각각 1.6~7.6cm, 0.11~0.86cm, $3.5 \sim 15.3 \times 10^{-2}\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 나타났다. 기류속도가 증가되면 개체군내에까지 亂流擴散의 영향이 미치게 된다. 인공광하에서 결정된 묘개체군의 공기역학적 특성은 살펴보면, 기류속도의 증가에 따라 조도장과 마찰속도는 증가되는 것으로 나타났다. 조도장은 공기의 흐름에 대한 지표면 및 개체군 표면의 거칠기를 의미하는 것으로서 조도장이 클수록 수직방향으로의 기류속도 변화가 높은 지점까지

영향을 미치게 된다. 마찰속도는 接地氣層내의 流動場을 나타내는 것으로서, 표면의 거칠기와 기류속도의 증가에 따라 크게 나타난다. 초장이 작은 생육단계에서 기류속도에 대한 마찰속도의 비율은 10~12%이나, 생육이 진행될수록 그 비율은 15~17% 로서 높게 나타났다.

그림 3은 생육실 중앙에서 공정묘의 성장단계에 따른 기온분포를 나타낸 것이다. 최고기온이 초장 근처에서 나타남을 알 수 있는데, 이러한 현상은 엽면적지수가 클수록 더욱 분명하게 나타났다. 그림 3에서 0.5, 1.4 및 2.6의 엽면적지수는 실험개시후 각각 0, 5 및 10일째에 해당되는 생육지수이다. 초장 보다 높은 위치에서의 온도는 초장 부근의 기온에 비해서 낮기 때문에 이 지점에서 기온의 구배는 負(-)의 값을 갖는다. 그림 4는 기류속도에 따른 Richardson數를 나타낸 것으로서, Richardson數는 $-0.07 \sim +0.01$ 의 범위를 나타내었다. 그림 2와 그림 3으로부터 個體群上の 기류가 不安定 또는 準中立 상태에 있음을 알 수 있다. 이것은 부력에 의해서 수직방향으로 기류의 혼합이 촉진됨을 의미한다. 즉 묘개체군상에 존재하는 혼합대류(mixed convection)에서 자연대류가 강제대류에 의한 난류확산의 크기를 증폭시키게 된다.

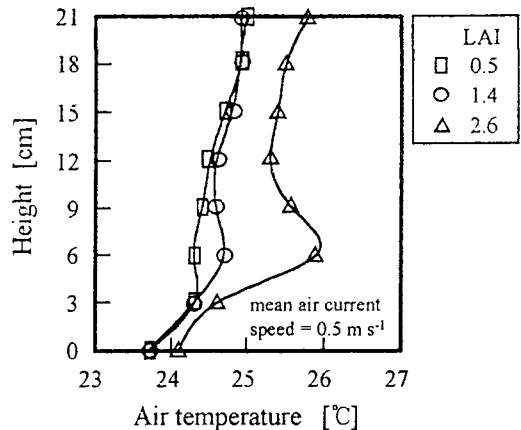


Fig. 3. Profiles of air temperature at the middle region as affected by the growth stages of plugs.

Table 2. Aerodynamic characteristics above the plug stand at a distance of 0.8m from the exit of main air flow conditioner.

u ($m \cdot s^{-1}$)	h (cm)	LAI	d (cm)	z_0 (cm)	u^* ($m \cdot s^{-1}, \times 10^2$)	r_a ($s \cdot m^{-1}$)	K_M ($m^2 \cdot s^{-1}, \times 10^3$)
0.32	5.34	0.52	1.74	0.18	3.47	159.8	4.25
0.51	5.20	0.53	1.61	0.11	5.20	100.8	5.41
0.70	4.98	0.50	1.98	0.22	8.71	86.7	6.19
0.92	5.15	0.57	1.70	0.29	11.83	62.2	7.71
0.28	7.68	1.40	4.76	0.54	4.75	145.1	3.40
0.46	7.18	1.33	4.36	0.61	8.01	91.1	4.43
0.70	7.00	1.29	4.18	0.70	12.13	56.3	7.33
0.86	6.80	1.37	4.56	0.44	12.85	62.2	7.36
0.30	9.10	2.60	6.28	0.40	5.01	245.3	2.30
0.42	9.28	2.51	7.62	0.36	6.48	216.2	2.58
0.61	8.99	2.56	7.35	0.37	9.91	109.3	4.19
0.73	8.33	2.59	6.45	0.86	15.32	95.7	5.27

u : air current speed.
 h : average plant height.
 LAI : leaf area index.

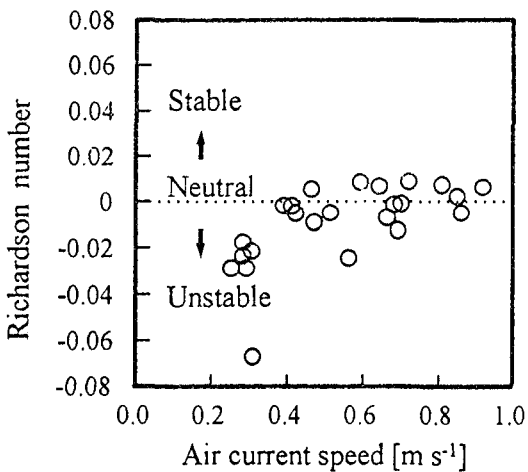


Fig. 4. Richardson number as affected by the air current speed over a stand of plugs.

난류대기저항과 엽면경계층저항이 포함된 공기역학적 저항에 미치는 기류속도의 영향이

그림 5에 실려 있다. 풍동의 주정류장치 출구로부터 0.8m 떨어진 지점에 해당되는 묘개체군의 중앙부에서 공기역학적 저항은 기류속도 0.3~0.9m·s⁻¹의 범위에 따라 56.3~245.3s·m⁻¹로 나타났으나, 기류속도가 낮을수록 공기역학적 저항은 매우 크게 나타났다. 또한, 평균초장이 큰 개체군위에서의 공기역학적 저항은 초장이 작은 경우에 비해서 분명히 높게 나타났다. 한편 주정류장치 출구로부터 1.3m 떨어진 지점에 해당되는 묘개체군 후부에서의 공기역학적 저항은 중앙부에서의 저항에 비해서 7.2~57.1% (평균 25% 정도) 높게 나타났다. 비록 기류속도의 진행방향은 동일할지라도 묘개체군의 위치에 따라 확산저항의 차이가 존재하며 이로 말미암아 묘개체군내로 열 및 물질 확산이 원활하게 이루어지지 않게 된다. 그림 6은 묘개체군의 중앙부에서 공기역학적 저항의 변화에 미치는 평균초장의 효과를 나타낸 것으로서, 생육이 진행될수록 공기역학적 저항의 변화에 미치는 평균초장의

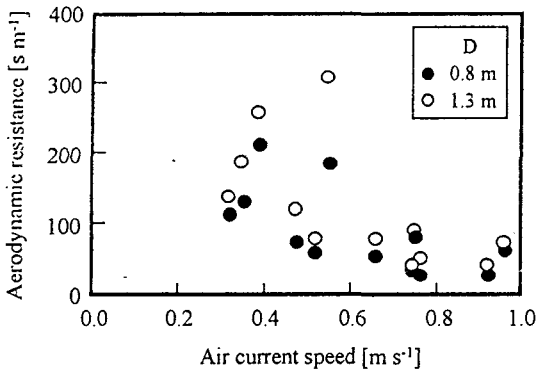


Fig. 5. Aerodynamic resistance as affected by the air current speed and the distance from the exit of the main air flow conditioner (D).

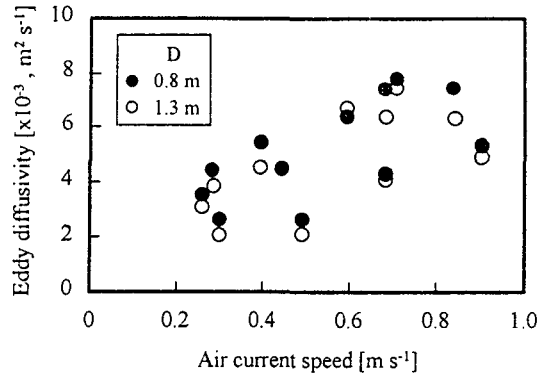


Fig. 7. Eddy diffusivity as affected by the air current speed and the distance from the exit of the main air flow conditioner (D).

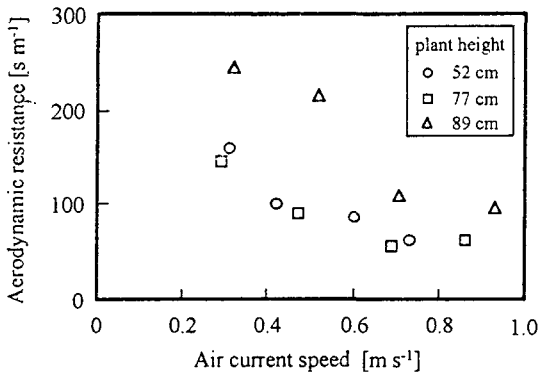


Fig. 6. Aerodynamic resistance at a distance of 0.8m from the exit of main air flow conditioner as affected by the air current speed and the average plant height.

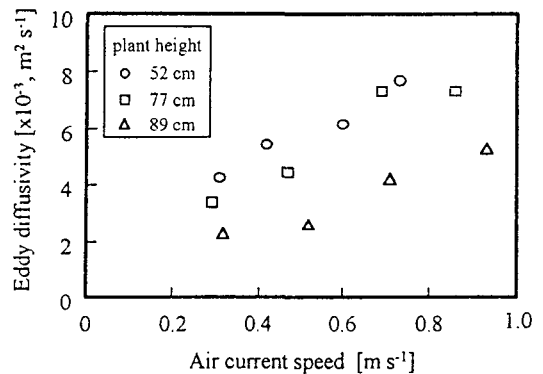


Fig. 8. Eddy diffusivity at a distance of 0.8m from the exit of main air flow conditioner as affected by the air current speed and the average plant height.

효과가 분명하게 나타났다. 그림 7은 기류속도에 따른 확산계수의 변화를 나타낸 것이다. 묘개체군 중앙부에서의 확산계수는 측정된 기류속도의 범위에서 $2.3 \times 10^{-3} \sim 7.7 \times 10^{-3} m^2 \cdot s^{-1}$ 로 나타났다. 기류속도의 증가에 따라 확산계수가 거의 직선적인 관계를 갖으며 증가

하였는데, $0.9 m \cdot s^{-1}$ 에서의 확산계수는 $0.3 m \cdot s^{-1}$ 의 경우에 비해서 약 2배 정도 높게 나타났다. 1기압 $25^\circ C$ 에서 수증기와 CO_2 의 확산계수가 각각 $2.56 \times 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$, $1.64 \times 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$ 임을 고려할 때 본 실험에서 결정된 확산계수는 기류속도의 영향에 의해서 매우 크

게 나타났다. 한편, 묘개체군 후부에서의 확산계수는 중앙부에서의 확산계수에 비해서 1.6~23.1%(평균 15% 정도) 낮게 나타났다. 공기역학적 저항이 확산계수의 逆數에 대한 적분으로 정의되므로 후부에서의 확산저항이 증가하면 확산계수는 감소할 수 밖에 없다. 그림 8은 확산계수에 미치는 평균초장의 효과를 나타낸 것으로서, 공기역학적 저항이 높게 나타나는 생육단계에서 묘개체군상의 확산계수는 가장 낮게 나타났다.

摘 要

인공광하의 공정육묘용 풍동을 이용하여 기류속도의 조절에 따른 묘개체군 위에서의 기류의 안정성, 공기역학적 저항 및 확산계수를 분석하였다. $0.3\sim 0.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 기류속도 범위에서 Richardson數는 $-0.07\sim +0.01$ 로 나타나, 본 연구에서 설계된 풍동내 묘개체군 위에서의 기류가 不安定 또는 準中立 상태에 있으며, 부력의 영향에 의해서 수직방향으로 기류의 혼합이 촉진되는 것으로 나타났다. 묘개체군의 후부에서 공기역학적 저항은 $56.3\sim 245.3\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ 로서, 묘개체군 중앙부에서의 공기역학적 저항에 비해서 약 25% 정도 높게 나타났다. 공기역학적 저항은 기류속도가 낮을수록 또한 평균초장이 클수록 매우 크게 나타났다. 기류속도의 증가에 따라 확산계수는 거의 직선적인 관계를 갖으며 증가하였으며, $0.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서의 확산계수는 $0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 경우에 비해서 약 2배 정도 높게 나타났다. 묘개체군 후부에서의 확산계수는 중앙부의 경우에 비해서 평균 15% 정도 낮게 나타났다. 상기의 결과는 기류의 진행방향으로 묘개체군의 위치에 따라 확산저항의 차이가 존재하여 묘개체군내로 열 및 물질의 확산이 제대로 이루어지지 않음을 의미한다. 결과적으로 묘개체군의 위치에 따라 광합성속도의 차이, 즉 성장속도의 차이가 나타나며 이로 말미암아 공정묘의 성장과 품질이 다르게 나타날 수 있

다. 본 연구에서 개발된 공정육묘 생산용 풍동은 인공광하의 반폐쇄 생태계 식물생산 시스템에서 기류속도가 묘개체군의 미기상 분포 및 공정묘의 성장에 미치는 효과 분석에 유용할 것이다.

引用文獻

1. 김용현, 古在豊樹. 1996. 人工光下에서 工程育苗 個體群上の 空氣力學的 抵抗 및 擴散係數. 한국생물생산시설환경학회 학술발표논문요지 5(2): 76-80.
2. 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.
3. 失吹萬壽. 1985. 植物の動的環境. 朝倉書店. pp. 5-8.
4. Bean, H.H. 1971. Fluid meters : their theory and applications. The American Society of Mechanical Engineers, N.Y. pp. 179-196.
5. Dyer, A.J. and B.B. Hicks. 1970. Flux-gradient relationships in the constant flux layer. Quarterly. J. Royal Meteorology Soc. 96: 715-721.
6. Kim, Y.H., T. Kozai, Y. Kitaya and C. Kubota. 1996. Design of a wind tunnel for plug seedlings production under artificial lighting. Abstracts of International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems p. 99.
7. Monteith, J.L. 1973. Principles of environmental physics. Edward Arnold, London. pp. 86-99.
8. Thom, A.S. 1973. Momentum, mass and heat exchange of plant communities, in Vegetation and the atmosphere, Vol. 1 (Ed. by Monteith, J.L. Academic press, N.Y.). pp. 57-109.