

人工光下에서 플러그묘 個體群上の 空氣力學的 特性

Aerodynamic characteristics above the plug stand

under artificial light

김용현* 古在豊樹**

정희원

Y.H. Kim T. Kozai

1. 서론

플러그묘의 성장과 품질은 플러그묘 個體群(이하 '개체군'이라 칭함)내 微氣象의 영향을 크게 받기 때문에 플러그묘의 성장과 개체군내 미기상과의 관계를 해명하려면 개체군내의 물리적 환경 요인에 대한 계측이 선행되어야 한다. 현재까지, 식물생태계의 미기상 변화에 따른 작물생육의 반응 또는 식물생태군의 공기역학적 특성과 관련된 연구는 露地植物을 대상으로 광범위하게 이루어져 왔으나, 植物種苗工場과 같은 폐쇄계 식물생산 시설에서 묘개체군내의 미기상 특성에 관한 연구는 전무한 실정이다. 더구나, 인공광하에서 플러그묘가 생산될 때 개체군외의 기류속도가 개체군내의 미기상 변화에 크게 관여하는 것으로 판단되나, 이에 관한 정량적인 해석이 시도되지 않고 있다. 플러그묘 개체군내의 미기상 성립기구에 관한 이론적인 연구는 품질이 균일한 플러그묘 생산을 위한 환경제어 기술의 확립에 기여할 것이다. 본 연구에서는 인공광하에서 기류제어가 가능하도록 설계된 플러그묘 육성용 풍동을 이용하여 개체군 위에서의 공기역학적 특성에 대해서 보고한다.

2. 재료 및 방법

가. 실험용 풍동의 정류장치 설계

整流裝置, 생육실, 송풍기와 송풍량 제어장치, 및 광원 등으로 구성된 플러그묘 육성용 풍동은 미국기계공학회(American Society of Mechanical Engineers, ASME)의 설계기준²⁾에 의해서 제작되었다. 金등¹⁾과 Kim등³⁾이 설계한 풍동의 개략도가 그림 1에 실려 있다. 배지표면 위 37 cm 높이에 설치된 광원은 배지 표면위에서 균일한 光合成光量子束密度(photosynthetic photon flux density)가 나타나도록 배치되었다.

나. 플러그묘 개체군상의 기류속도 분포 및 공기역학적 특성

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

* 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

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left\{ \frac{(z-d)}{z_0} \right\} \quad (1)$$

여기서, $u(z)$: 임의의 높이 z 에서 기류속도 ($m\ s^{-1}$), u_* : 摩擦速度 ($m\ s^{-1}$), κ : von Karman 상수 (=0.4), d : 地面修正量 (m), z_0 : 粗度長 (m) 이다. 식물군락위의 기류속도 분포가 中立條件下에서 식(4)와 같이 對數函數로 표시되므로 임의의 높이, 지면수정량 및 조도장이 포함된 값, 즉 $(z-d)/z_0$ 에 대한 對數値와 기류속도의 실측치에 최소자승법을 적용하여 기류속도 분포와 관련된 모수를 결정하였다. 이 때 선형회귀식의 기울기가 u_*/κ 에 해당되며, 회귀식과 y 축과의 교점은 조도장의 對數値에 해당된다. 한편, 지면수정량은 회귀식의 직선성을 가장 높게 하는 값으로 추정된다.

기류속도의 분포에 미치는 浮力の 크기를 결정하는 모수로서 사용되는 Richardson數 (R_i)와 Monin Obukhov 길이 (L)는 다음과 같이 정의된다. Richardson數와 Monin Obukhov 길이는 대기가 안정상태의 경우 正(+), 불안정 상태의 경우 負(-)의 값을 갖는다.

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

$$L = - \frac{\rho c_p T u_*^3}{\kappa g C} \quad (3)$$

여기서, g : 중력가속도(=9.81 $m\ s^{-2}$), T_1, T_2 : 임의의 높이 z_1, z_2 에서의 기온(K), ρ : 공기의 밀도($kg\ m^{-3}$), c_p : 비열($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$), C : 현열유속($J\ s^{-1}\ m^{-2}$) 이다. 대기의 안정도에 따라 표개체군 위에서의 공기역학적 저항($r_a, s\ m^{-1}$) 및 확산계수($K_M, m^2\ s^{-1}$)는 다음 식으로 계산된다.^{4),5)}

1) 중립 상태

$$r_a = \frac{\{\ln(z-d)/z_0\}^2}{\kappa^2 u} \quad (4)$$

$$K_M = \kappa u (z-d) \quad (5)$$

2) 불안정 상태

$$r_a = \frac{\ln\{(z-d)/z_0\} + 4.5(z-d)/L}{\kappa u_*} \quad (6)$$

$$K_M = \kappa u_* z (1 - 16z/L)^{1/4} \quad (7)$$

다. 측정항목 및 방법

기류제어 및 개체군의 공기역학적 특성에 관한 실험은 실내온도와 상대습도가 각각 $22 \pm 0.5^\circ C$, $65 \pm 5\%$ 로 유지되는 대형 growth chamber 내에서 이루어졌다. 기류 속도는 육묘상자

의 배지 표면으로부터 18 cm 떨어진 높이에서 0.3, 0.5, 0.7 및 0.9 m s⁻¹ 의 4 수준으로 설정된 가운데, 열선풍속계 (Kanomax, 6071)에 의해서 측정되었다. 기류속도의 측정 부위는 정류 장치의 출구로부터 각각 0.3, 0.8 및 1.3 m 떨어진 지점에서 배지 표면위 3 cm 부터 27 cm 까지 3 cm 간격의 높이에 해당된다. 생육실내의 기온은 기류속도의 측정 지점과 동일한 위치에서 직경 0.1 mm의 열전대를 설치하여 측정하였다. 실험기간 동안 육묘상자의 배지 표면에서 광합성광량자속밀도의 평균값은 300±8 μmol m⁻² s⁻¹ 으로 유지되었다. 공시식물로서 사용된 가지(*Solanum melongna* L.)의 플러그묘는 播種後 15일간의 육묘기간 동안 2매의 本葉을 갖는 플러그묘로 육성되었다. 실험개시일에 플러그묘의 평균초장과 엽면적지수는 각각 52 mm 및 0.5 이었다.

3. 결과 및 고찰

표 1은 풍동의 주정류장치 출구로부터 0.8 m 떨어진 지점에 해당되는 묘개체군 중앙부 (이하 '중앙부'라 칭함)에서의 기류속도 및 플러그묘의 초장에 따른 개체군의 공기역학적 특성을 나타낸 것이다. 기류속도의 증가에 따라 지면수량은 감소하는 경향을 나타내었으나, 조도장과 마찰속도는 증가되는 것으로 나타났다. 플러그묘의 초장이 증가함에 따라 지면수량은 그림 2와 같이 거의 직선적으로 증가하였으나, 초장과 조도장의 상관관계는 상대적으로 높지 않게 나타났다.

Table 1. Aerodynamic characteristics above the plug stand at a distance of 0.8 m from the exit of main air flow conditioner.

u (m s ⁻¹)	h (cm)	LAI	d (cm)	z ₀ (cm)	u [*] (m s ⁻¹ , x10 ²)	r _a (s m ⁻¹)	K _M (m ² s ⁻¹ , x10 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

그림 3은 기류속도에 따른 Richardson數를 나타낸 것으로서, Richardson數는 $-0.07 \sim +0.01$ 의 범위를 나타내었다. 이 결과로부터 個體群上의 기류가 不安定 또는 準中立 상태에 있을 수 있다. 이것은 부력에 의해서 수직방향으로 기류의 혼합이 촉진됨을 의미한다. 중앙부에서 공기역학적 저항은 기류속도 $0.3 \sim 0.9 \text{ m s}^{-1}$ 의 범위에 따라 $56.3 \sim 245.3 \text{ s m}^{-1}$ 로 나타났으나, 기류속도가 낮을수록 공기역학적 저항은 매우 크게 나타났다(그림 4 참조). 한편 주정류장치 출구로부터 1.3 m 떨어진 지점에 해당되는 묘개체군 후부(이하 '후부'라 칭함)에서의 공기역학적 저항은 중앙부에서의 저항에 비해서 7.2~57.1 % (평균 25 % 정도) 높게 나타났다. 그림 5는 기류속도에 따른 확산계수의 변화를 나타낸 것이다. 중앙부에서의 확산계수는 측정된 기류속도의 범위에서 $2.3 \times 10^{-3} \sim 7.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 로 나타났다. 기류속도의 증가에 따라 확산계수가 거의 직선적인 관계를 갖으며 증가하였는 데, 0.9 m s^{-1} 에서의 확산계수는 0.3 m s^{-1} 의 경우에 비해서 약 2배 정도 높게 나타났다. 1기압 25°C 에서 수증기와 CO_2 의 확산계수가 각각 $2.56 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $1.64 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 임을 고려할 때 본 실험에서 결정된 확산계수는 기류속도의 영향에 의해서 매우 크게 나타났다. 한편, 후부에서의 확산계수는 중앙부에서의 확산계수에 비해서 1.6~23.1 % (평균 15 % 정도) 낮게 나타났다.

4. 요약 및 결론

인공광하의 플러그묘 육성용 풍동을 이용하여 묘개체군의 지면수정량, 조도장, 마찰속도 등과 같은 공기역학적 특성이 분석되었다. 또한, 묘개체군 위에서 공기의 安定度에 기초하여 공기역학적 저항과 확산계수가 계산되었다. 기류속도의 진행방향으로 묘개체군의 위치에 따라 확산저항의 차이가 존재하며, 이에 따라 묘개체군내로 열 및 물질의 확산이 제대로 이루어지지 않게 된다. 결과적으로 묘개체군의 위치에 따라 광합성속도의 차이가 나타나며 이로 말미암아 공정묘의 생장과 품질이 다르게 나타날 수 있다. 본 연구에서 개발된 플러그묘 육성용 풍동은 인공광하의 반폐쇄 생태계 식물생산 시스템에서 기류속도가 묘개체군의 미기상 분포 및 플러그묘의 생장에 미치는 효과 분석에 유용할 것이다.

5. 참고문헌

1. 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.
2. Bean, H.H. 1971. Fluid meters : their theory and applications. The American Society of Mechanical Engineers, N.Y. pp.179-196.
3. 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.
4. Monteith, J.L. 1973. Principles of environmental physics. Edward Arnold, London. pp.86-99.
5. 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.

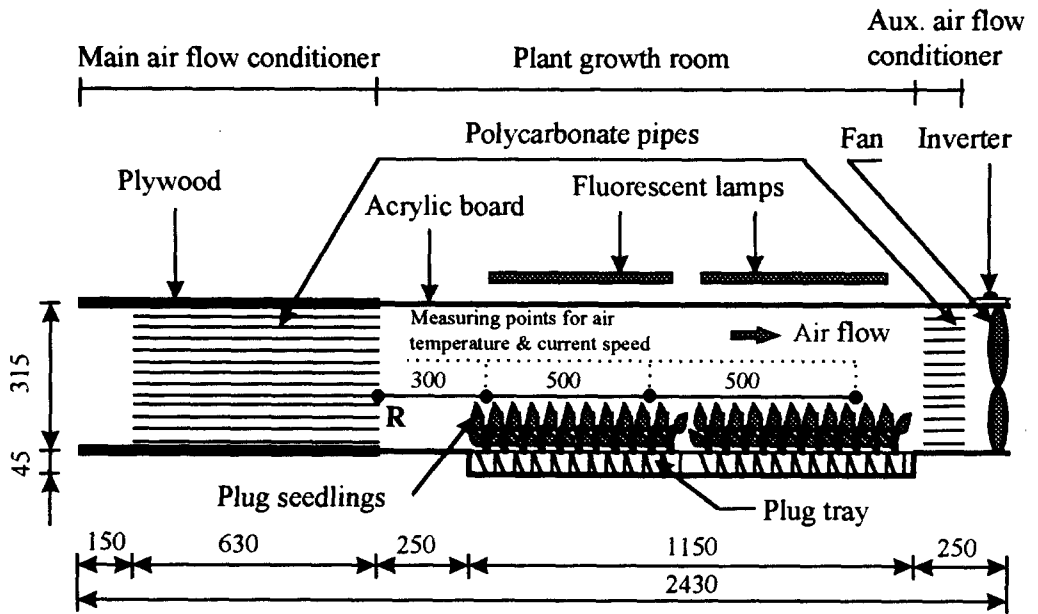


Fig. 1. Cross-sectional view of a wind tunnel [unit : mm].

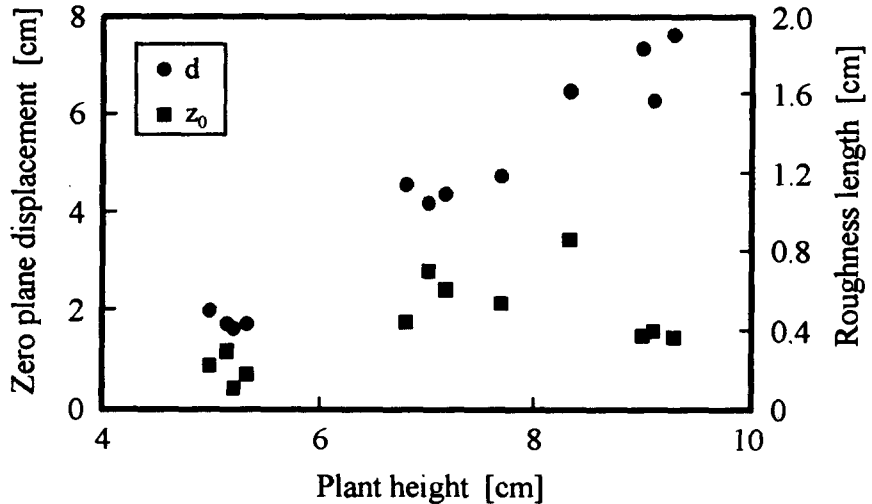


Fig. 2. Zero plane displacement (d) and roughness length (z_0) above the plug stand as affected by plant height.

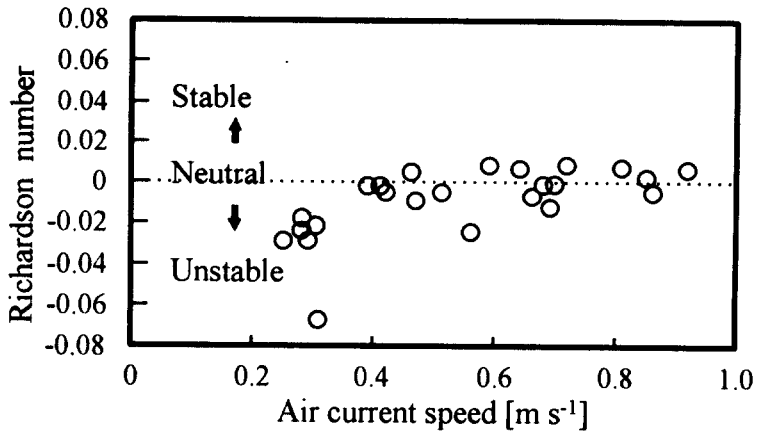


Fig. 3. Richardson number as affected by the air current speed above the plug stand.

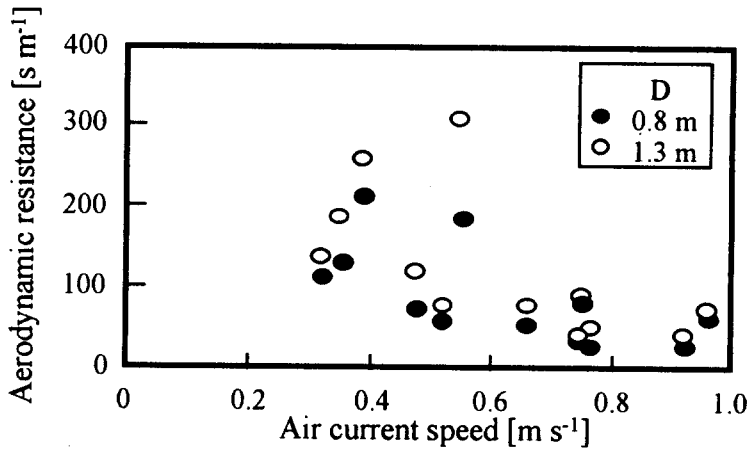


Fig. 4. Aerodynamic resistance as affected by the air current speed and the distance from the exit of the main air flow conditioner(D).

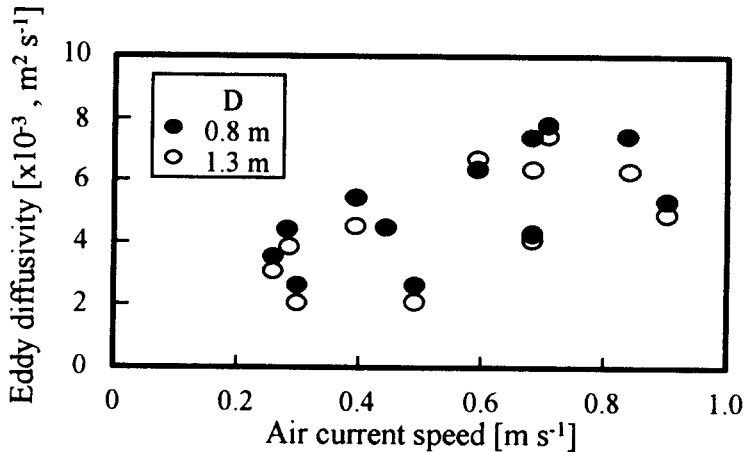


Fig. 5. Eddy diffusivity as affected by the air current speed and the distance from the exit of the main air flow conditioner (D).