

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

Design of a Wind Tunnel for Plug Seedlings Production under Artificial Light and Aerodynamic Characteristics above Plug Stand

김 용 현* 古在豐樹**
정희원
Y. H. Kim T. Kozai

ABSTRACT

A wind tunnel consisting of two air flow conditioners with polycarbonate pipes, a plant growth room, a suction fan and fan controller, and fluorescent lamps, was designed to investigate the interactions between the growth of plug seedlings under artificial light and their physical environments. Light transmissivities in the plant growth room based on the photosynthetic photon flux density and photosynthetically active radiation was appeared to be 96.3% and 96.8%, respectively. Measurement showed a uniformity in the vertical profiles of air current speed at the middle and rear regions of plug trays in wind tunnel. This result indicated that the development of a wind tunnel based on the design criteria of the American Society of Mechanical Engineers was adequate. Air current speed inside the plug stand was significantly decreased due to the resistance by the leaves of plug seedlings and boundary layer developed over and below the plug stand. Driving force to facilitate the diffusion of gas inside the plug stand might be regarded as extremely low. Aerodynamic characteristics above the plug stand under artificial light were investigated. As the air current speed increased, zero plane displacement decreased but roughness length and frictional velocity increased. Zero plane displacement linearly increased with the average height of plug seedlings. The wind tunnel developed in this study would be useful to investigate the effects of air current speed on the microclimate over and inside the plug stand and to collect basic data for a large-scale plug production under artificial light in a semi-closed ecosystem.

주요 용어(Key Words) : 공기역학적 특성(Aerodynamic Characteristics), 공정묘(Plug Seedlings), 기류속도분포(Air Current Speed Profiles), 인공광(Artificial Light), 풍동(Wind Tunnel)

1. 서론

공정육묘(이하 '공정묘'라 칭함)는 묘생산의
省力化가 용이하므로 이용이 계속 증대되고 있

다. 공정묘의 생산자는 재배농가의 위탁을 받아
묘를 생산하며, 재배농가와 같은 묘구입자는 주
문한 공정묘를 공급받아 정식을 하게 된다. 이
경우, 공정묘의 생산자는 묘구입자가 요구하는

* 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

적기에 양질의 묘를 육성하여 공급하지 않으면 아니된다. 현재, 공정묘는 기후의 영향을 쉽게 받는 自然光下에서 대부분의 생산이 이루어지기 때문에 계획적인 묘생산이 불가능하다. 향후 植物工場(Plant factory) 또는 閉鎖生態系生命維持 시스템(Controlled ecological life support system, CELSS)과 같이 閉鎖度가 높은 식물생산 시스템에서는 식물종묘 생산의 대부분이 人工光을 이용한 조건에서 이루어질 것으로 예상된다. 공정묘의 수요 증대 또는 일시적인 수요 집중에 대한 대응과 더불어 인공광하에서 품질이 균일한 공정묘를 안정적으로 생산하려면 이를 위한 공정묘의 대량생산 시스템 개발 및 환경제어 기술의 확립이 필요하다. 공정묘의 성장과 품질은 工程苗個體群(이하 '개체군'이라 칭함)내 微氣象의 영향을 크게 받는다. 더구나, 인공광하에서 공정묘를 생산할 경우 개체군내의 미기상은 광원의 종류, 조명방법, 기류제어 등에 따라 다르게 나타난다. 공정묘의 성장과 개체군내 미기상과의 관계를 해명하려면, 개체군내의 물리적 환경요인에 대한 계측이 선행되어야 한다. 현재까지, 식물생태계의 미기상 변화에 따른 작물생육의 반응 또는 식물생태군의 공기역학적 특성과 관련된 연구^{5), 6), 7), 8), 9)}는 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 공정묘가 생산될 때 개체군의 기류속도가 개체군내의 미기상 변화에 크게 관여하는 것으로 판단되나, 이에 관한 정량적인 해석이 시도되지 않고 있다. 최근에 Kim 등⁴⁾은 기류제어가 공정묘의 성장에 미치는 영향을 구명하고자 工程苗 育成用 風洞을 설계한 후 인공광하에서 개체군내의 미기상 특성에 관하여 보고한 바 있다. 공정묘 개체군내의 미기상 성립기구에 관한 이론적인 연구는 균일한 공정묘 생산을 위한 환경제어 기술의 확립에 기여할 것이다. 특히, 기류제어 실험에 의해서 열 및 물질확산에 따라 형성되는 개체군내의 미기상 요인을 구명하려면, 균일한 기류속도 분포를 나타내는 공정

묘 생산용 풍동이 요구된다. 그러므로 본 연구에서는 인공광하에서 기류제어가 가능하도록 설계된 공정묘 생산용 풍동을 이용하여 개체군내에서의 기류속도 분포 및 개체군 위에서의 공기역학적 특성에 대해서 보고한다.

2. 재료 및 방법

가. 실험용 풍동의 정류장치 설계

본 연구에서 제작된 공정묘 생산용 풍동은 整流裝置(air flow conditioner), 생육실, 송풍기와 송풍량 제어장치, 및 광원으로 구성된다. 미국기계공학회(American Society of Mechanical Engineers, ASME)는 풍동내의 균일한 기류속도를 확보하기 위한 정류장치의 설계 기준²⁾을 다음과 같이 제시하였다.

$$d \leq D/4 \tag{1}$$

$$L \geq 8 d \tag{2}$$

$$n \pi d^2/4 \leq 0.5 \pi D^2/4 \tag{3}$$

여기서, d : 정류장치의 정류파이프 직경 (m),

D : 풍동 직경(m),

L : 정류장치의 길이(m),

n : 정류파이프의 수이다.

金등¹⁾과 Kim 등³⁾은 풍동내의 생육실에 폭 0.28m, 길이 0.55m의 육묘상자(plug tray) 2개가 길이 방향으로 놓이는 것으로 상정한 후, (1)~(3)

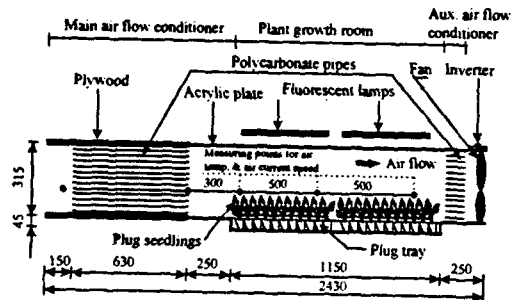


Fig. 1. Cross-sectional view of a wind tunnel (unit : mm).

식을 이용하여 균일한 기류속도를 얻기 위한 정방향 풍동의 한변의 길이를 0.315m로 결정하였다. 또한, 정류장치의 정류파이프로써 내경 24 mm, 외경 26mm, 길이 0.63m의 폴리카보네이트제 파이프가 사용되었다. 그림 1과 같이 풍동의 입구측에 상기의 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 $33\text{m}^3\text{min}^{-1}$, 12.5mmAq 으로서, 排氣式으로 제작된 송풍기가 吸引式으로 개조되어 사용되었다. 풍동내의 기류속도는 송풍기의 송풍량을 제어하는 방식에 의해서 조절되며, 육묘상자에 담겨있는 배지 표면으로부터 18cm 떨어진 높이에서 일정한 기류속도가 유지되도록 기류속도 제어 시스템이 구성되었다. 광원으로는 55W의 백색형광등(FPL55EX-W)이 사용되었다. 배지 표면위 37 cm 높이에 설치된 광원은 배지 표면위에서 균일한 光合成光量子束密度(photosynthetic photon flux density)가 나타나도록 배치되었다.

Table 1 Specifications of wind tunnel designed in this experiment

Total size	: W 315 mm×H 315 m×L 430 m
Air flow conditioner	
material	: Polycarbonate pipes
main pipes	: ID 24 m×OD 26 m×L 630 m
auxiliary pipes	: ID 24 m×OD 26 m×L 100 m
Plant growth room	
material	: acrylic plate(5 m thick)
size	: W 315 m×H 315 m×L 1150 g
Fan & fan controller	
fan	: axial flow type (EF-30BSB, Mitsubishi Electric Co.)
air flow rate	: $33\text{m}^3\text{min}^{-1}$
static pressure	: 12.5 mmAq
fan controller	: fan inverter (FS-200C, Mitsubishi Electric Co.)
Light source	: fluorescent twin lamp (FPL55EX-W, Matsushita Electric Co.)

Table 2 Aerodynamic characteristics above the plug stand at middle region of plant growth room

u	h	LAI	d	z ₀	u*	u*/u	d/h	z ₀ /h
(m s ⁻¹)	(cm)		(cm)	(cm)	(m s ⁻¹ ×10 ²)			
0.32	5.34	0.52	1.74	0.18	3.47	0.035	0.33	0.034
0.51	5.20	0.53	1.61	0.11	5.20	0.052	0.31	0.021
0.70	4.98	0.50	1.98	0.22	8.71	0.087	0.40	0.044
0.92	5.15	0.57	1.70	0.29	11.83	0.118	0.33	0.056
0.28	7.68	1.40	4.76	0.54	4.75	0.048	0.62	0.070
0.46	7.18	1.33	4.36	0.61	8.01	0.080	0.61	0.085
0.70	7.00	1.29	4.18	0.70	12.13	0.121	0.60	0.100
0.86	6.80	1.37	4.56	0.44	12.85	0.129	0.67	0.065
0.30	9.10	2.60	6.28	0.40	5.01	0.050	0.69	0.044
0.42	9.28	2.51	7.62	0.36	6.48	0.065	0.82	0.039
0.61	8.99	2.56	7.35	0.37	9.91	0.099	0.82	0.041
0.73	8.33	2.59	6.45	0.86	15.32	0.153	0.77	0.103

u : air current speed

h : average plant height

LAI : leaf area index

나. 공정묘 개체군상의 기류속도 분포 및 공기역학적 특성

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

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

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

u^* : 摩擦速度 ($m s^{-1}$)

k : 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^*/k 에 해당되며, 회귀식과 y 축과의 교점은 조도장의 對數値에 해당된다. 한편, 지면수정량은 회귀식의 직선성을 가장 높게 하는 값으로 추정된다.

다. 측정항목 및 방법

기류제어 및 개체군의 공기역학적 특성에 관한 실험은 실내온도와 상대습도가 각각 22 ± 0.5 °C, $65 \pm 5\%$ 로 유지되는 대형 growth chamber 내에서 이루어졌다. 아크릴판으로 제작된 생육실의 광투과율을 살펴보고자 광량자센서(LI-COR, LI190S)와 400~700nm 범위의 광합성유효복사(photosynthetically active radiation) 측정용 센서(LI-COR, LI192)를 사용하여 인공광으로부터의 수직거리에 따른 광량을 측정하였다. 광량의 측정지점은 광원으로부터의 수직거리에 의해서 광원근처를 0 cm, 배지표면을 35 cm 로 설정한 가운데 5 cm 간격으로 광량을 측

정하였다. 기류 속도는 육묘상자의 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 정류장치의 출구로부터 각각 0.3, 0.8 및 1.3m 떨어진 지점에서 배지 표면위 3 cm 부터 27 cm 까지 3 cm 간격의 높이에 해당된다. 생육실내의 기온은 기류속도의 측정 지점과 동일한 위치에서 열전대(Copper-constantan thermocouple, $\phi 0.1mm$)를 설치하여 측정하였다. 실험기간 동안 육묘상자의 배지 표면에서 광합성광량자속밀도의 평균값은 $300 \pm 8 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 으로 유지되었다. 공시식물로서 사용된 가지(*Solanum melongna* L.)의 공정묘는 播種後 15 일간의 육묘기간 동안 2매의 本葉을 갖는 공정묘로 육성되었다. 실험개시일에 공정묘의 평균 초장과 엽면적지수는 각각 52 mm 및 0.5 이었다.

3. 결과 및 고찰

가. 생육실의 광투과율

그림 2는 광원으로부터의 수직거리에 따른 광합성광량자속밀도 및 광합성유효복사를 나타낸 것이다. 광원으로 사용된 백색형광등 근처에서 광합성광량자속밀도와 광합성유효복사의 최고치는 각각 $650 \mu mol m^{-2} s^{-1}$, $147 W m^{-2}$ 로 나타났다. 한편 배지표면에서의 광합성광량자속밀도

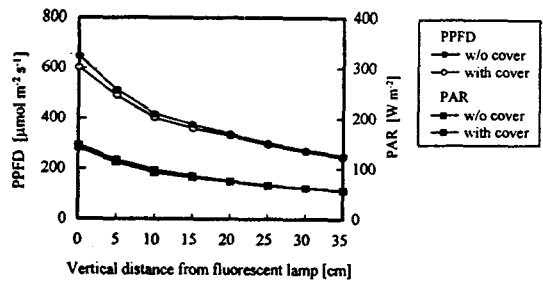


Fig. 2 Photosynthetic photon flux density and photosynthetic active radiation as affected by the vertical distance from fluorescent lamps.

와 광합성유효복사는 각각 $296\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 57 W m^{-2} 로서 광원으로부터의 수직거리가 증가함에 따라 대수함수적으로 감소하였다. 광합성광량자속밀도와 광합성유효복사에 기준한 생육실 광투과율의 평균치는 각각 96.3%, 96.8%로서 동일하게 나타났다. 광원으로부터의 수직거리가 증가할수록 즉, 배지표면에 근접할수록 광투과율이 광원 근처의 경우에 비해서 2.7~4.3% 증가하였는데 이것은 생육실 측면으로부터 반사된 광량에 기인한 것으로 판단된다.

나. 공정묘 개체군내외에서의 기류속도 분포

그림 3은 생육실내에 공정묘가 들어있지 않은 경우 생육실의 중앙에서 기류속도가 0.3 m s^{-1} 및 1.5 m s^{-1} 를 유지하도록 송풍기의 풍량을 조절한 가운데 주정류장치의 출구로부터 각각 0.3 m, 0.8 m 및 1.3 m 떨어진 지점 (이하에서 생육실의 前部, 中央 및 後部로 칭함) 에서 측정된 기류속도

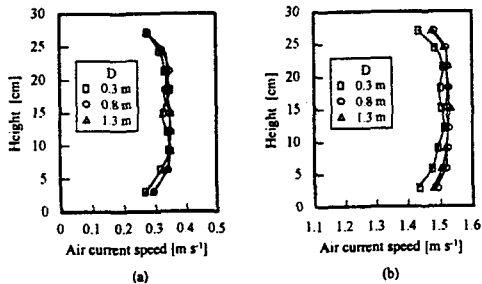


Fig. 3 Profiles of air current speed in the wind tunnel without plug seedlings as affected by the distance from the exit of the main air flow conditioner(D) and the average air current speed(π).

(a) $\pi 0.33 \text{ m s}^{-1}$ (b) $\pi 1.50 \text{ m s}^{-1}$.

분포에 해당된다. 기류속도가 0.3 m s^{-1} 로 조절된 경우 생육실의 前部, 中央 및 後部에서 기류속도 분포의 평균치는 각각 $0.32 \pm 0.03 \text{ m s}^{-1}$, $0.33 \pm 0.03 \text{ m s}^{-1}$, $0.33 \pm 0.03 \text{ m s}^{-1}$ 로서 기류속도의 설정치와 유사하게 나타났다. 또한 기류속도

가 1.5 m s^{-1} 로 조절된 경우 생육실의 前部, 中央 및 後部에서 기류속도 분포의 평균치는 각각 $1.49 \pm 0.03 \text{ m s}^{-1}$, $1.51 \pm 0.02 \text{ m s}^{-1}$, $1.51 \pm 0.02 \text{ m s}^{-1}$ 로서 0.3 m s^{-1} 로 조절된 경우에 비해서 설정치에 더욱 근사한 기류속도를 나타내었다. 결과적으로 생육실내의 기류분포가 매우 균일하게 나타나, ASME의 설계 기준에 기초하여 제작된 풍동내 정류장치 직경 및 길이의 결정이 유효한 것으로 확인되었다. 생육실 내에서의 기류분포는 주정류장치의 출구로부터 멀어질수록 더욱 균일하게 나타났는데, 이것은 주정류장치의 출구 근처에서는 기류가 충분히 발달하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 그림 4는 생육실내에 공정묘가 들어있는 경우로서, 생육단계에 의한 기류속도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 0.5, 1.4 및 2.6의 엽면적지수(Leaf area index, LAI)는 각각 실험 개시후 0, 5 및 10 일째의 공정묘에 해당되는 생육지수이다. 공정묘의 생육

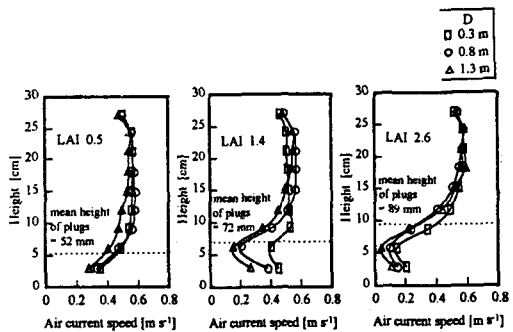


Fig. 4 Profiles of air current speed inside and over a stand of plugs at the average air speed of 0.5 m s^{-1} , as affected by the growth stages of plug seedlings(their leaf area index, LAI) and the distance from the exit of the main air flow conditioner (D).

이 이루어짐에 따라 개체군내의 기류속도는 초장 및 엽면적에 의한 저항을 크게 받아, 기류속도가 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 엽면적지수가 2.6인 경우 군락내의 기류속도가 0.2 m s^{-1} 이하로 감소하여 개체군내의 가스 확

산에 필요한 공기의 구동력이 매우 작게 나타났다. 또한, 개체군위 근처의 기류속도는 엽면적지수의 증가에 따라 급속히 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 공정묘 개체군내외에서 발달된 葉面境界層抵抗 및 개체군 주위의 亂流擴散抵抗에 기인한 것으로 판단된다. 결국 개체군내외에서 발달된 엽면경계층의 두께는 기류속도, 공정묘의 초장 및 엽면적지수 등에 따라 다르게 나타남을 알 수 있다.

다. 공정묘 개체군상의 공기역학적 특성

표 2는 생육실 중앙부에서의 기류속도 및 공정묘의 초장에 따른 개체군의 공기역학적 특성을 나타낸 것이다. 기류속도가 $0.30\sim 0.92\text{ m s}^{-1}$ 의 범위에서 변화될 때 지면수정량, 조도장 및 마찰속도는 각각 $1.6\sim 7.6\text{ cm}$, $0.11\sim 0.86\text{ cm}$, $3.5\sim 15.3 \times 10^{-2}\text{ m s}^{-1}$ 로 나타났다. 기류속도가 증가되면 개체군내에까지 亂流의 영향이 미치게 된다. 인공광하의 기류제어에 의해서 시도된 묘 개체군의 공기역학적 특성은 다음과 같다. 기류속도의 증가에 따라 지면수정량은 감소하는 경향을 나타내었으나, 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. 공정묘의 초장이 증가함에 따라 지면수정량은 그림 5와 같이 거의 직선적으로 증가하였으나, 초장과 조도장의 상관관계는 상대적으로 높지 않게 나타났다. 인공광하의 개체군에서 지면수정량에 대한 초장의 비율은 0.3~0.8(평균 0.58)로서 자연조건하에서의 실험 결과와 유사한 것으로 나타났다. 한편, 조도장에 대한 초장의 비율은 0.02~0.10(평균 0.

06)으로서 다소 낮게 나타났다.

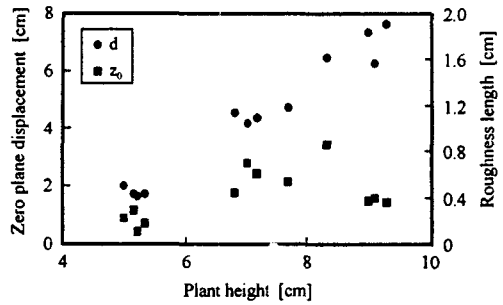


Fig. 5 Zero plane displacement(d) and roughness length(z0) above the plug stand as affected by plant height.

4. 결론

인공광하에서 기류제어가 공정묘 개체군의 공기역학적 특성 및 생육에 미치는 영향을 분석하기 위하여 공정묘 생산용 풍동을 설계 및 제작하였다. 광합성광량자속밀도와 광합성유효복사에 기준한 생육실 광투과율의 평균치는 각각 96.3%, 96.8% 로서 동일하게 나타났다. 풍동내에서 기류속도를 측정된 결과 기류속도 분포가 생육실내에서 균일하게 나타나, ASME의 설계 기준에 기초하여 제작된 풍동내의 정류장치의 직경과 길이의 결정이 유효한 것으로 확인되었다. 공정묘의 생육이 진행됨에 따라 개체군내의 기류속도는 초장 및 엽면적에 의한 저항을 크게 받아, 기류속도가 현저하게 감소되었다. 이에 따라 개체군내의 가스 확산에 필요한 공기의 구동력이 매우 작은 것으로 판단된다. 인공광하의 공정묘 개체군에 대한 공기역학적 특성은 다음과 같다. 기류속도의 증가에 따라 지면수정량은 감소하는 경향을 나타내었으나, 조도장과 마찰속도는 증가되는 것으로 나타났다. 생육 초기단계에서 기류속도에 대한 마찰속도의 비율은 10~12% 이나, 생육이 진행될수록 그 비율은 15~17% 로서 높게 나타났다. 공정묘의 초장이 증가함에 따라 지면수정량은 거의 직선적으로 증가하였다. 인공광하의 개체군에서 지면수정량에 대한 초장의 비율은 0.3~0.8, 조도장에 대한 초장의 비율은 0.

0.2~0.10 로 나타났다. 본 연구에서 개발된 공정 육묘 생산용 풍동은 인공광하에서 개체군내의 기류속도가 공정묘 개체군내외에서의 미기상 분포 및 공정묘 성장에 미치는 효과 분석에 유용할 것이다.

인용문헌

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. Abstracts of International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems p.99.
4. Kim, Y.H., T. Kozai, Y. Kitaya and C. Kubota. 1996. Effects of air current speeds on the microclimate of plug stand under artificial lighting. Abstracts of International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems p.191.
5. Mao, G. and K. Kurata. 1994. Wind tunnel experiment on effect of rowcovers on wind profiles and turbulent diffusion above model canopy. J. Agricultural Meteorology in Japan. 50:97-100.
6. Seginer, I., P.J. Mulhearn, E.F. Bradley and J.J. Finnigan. 1976. Turbulent flow in a model plant canopy. Boundary-Layer Meteorology. 10:423-453.
7. Tanner, C.B. 1963. Energy relations in plant communities, in Environmental control of plant growth (Ed. by Evans, L.T. Academic press, N.Y.). pp.141-148.
8. Tolck, J.A., T.A. Howell, J.L. Steiner and D. R. Kreig. 1995. Aerodynamic characteristics of corn as determined by energy balance techniques, Agronomy J. 87:464-473.
9. Uchijima, Z., T. Udagawa, T. Horie and K. Kobayashi. 1970. Turbulent transfer coefficient and foliage exchange velocity within a corn canopy. J. Agricultural Meteorology in Japan. 25:215-227.