

Ventilation Effect of the Greenhouse with Folding Panel Type Windows

Jin-Young Kim* · Si-Young Lee¹ · Hyun-Hwan Kim¹ · Hee Chun¹ · In-Hak Yun²

Div. of Bio-Production Machinery, National Agricultural Mechanization
Research Institute R.D.A. Suwon 441-440, Korea

¹National Horticultural Research Institute, RDA Suwon 441-440, Korea

²Coa Engineering, Gangnamgu Seoul 150-100, Korea

Abstract

In this study, new development of natural ventilation window was accomplished to control environment of greenhouse with no use of forced ventilation during hot season. The ventilation effect of developed ventilation window was investigated in experimental greenhouse which was designed using side wall panel and folding type panel for natural ventilation. Folding panel type ventilation window was designed to open upper part of the side wall and top of the roof using two hinges which are located bottom of the side wall and the roof panel to grab one side of each panels and guide the other side along with the guidance rail. Developed ventilation window has top ventilation part with maximum moving distance $X=l(1-\cos\theta)=848.5$ mm and side ventilation part with maximum moving distance $Y=l/2 \times \sin\theta=1,184.4$ mm at 45° of theoretical opening angle. It took 4.5 minutes to open roof vent fully and temperature at 1.2 and 0.8 m height decreased after 1 minute from starting opening and became equilibrium state maintaining $3\sim 4^\circ\text{C}$ difference after 2 minutes from complete opening. Air exchange rate was $15.2\sim 39.3\text{ h}^{-1}$ which was more than $10\sim 15\text{ h}^{-1}$ of continuous type and Venlo type greenhouse. The descent effect of temperature by ventilation windows was two times higher than Venlo type greenhouse.

Key words: even span greenhouse, natural ventilating, venting

*Corresponding author

서 론

양지붕형의 유리온실과 경량온실은 대부분 '95년 이후 정부의 지원사업에 의해 본격적으로 보급되기 시작하여 2000년말 현재 유리온실은 323 ha, 경량온실은 81 ha가 설치되었다. 온실을 최대한 활용하기 위해서는 주년재배가 필수적이나 고온기 냉방에 소요되는 에너지가 난방에 비해 상대적으로 많기 때문에 온실 활용도가 떨어지고 있는 실정이다. 고온기 환기성능은 온실의 구조, 기상조건, 작물의 생육상태 등에 따라 다소의 차이가 있으나 환기횟수에 의해 크게 좌우된다. 환기횟수의 증가에 따른 실내기온의 강하효과가 환기횟수 60회/h 정도를 넘어서면서 급격히 둔화되는 현상을 보이기 때문에 권장 환기횟수는 60회/h 정도이며, 자연환기만으로는 온실내 온도를 낮출 수 없어 차광 스크린이나 증발냉각 등의 적극적인 방법이 필요하다(Woo 등, 1995; Suh 등, 1997). 자연환기 시스템은 에너지

를 사용하지 않거나 최소한으로 줄여 온실내 온도를 최소한 외부와 동일하게 하거나 낮게 하기 위한 장치라고 할 수 있다. 양지붕형 온실에서는 자연 환기를 위해서 측창으로 3Way 방식이나 권취식, 프로젝트방식 등 다양한 환기창을 사용하고 있으나 천창은 주로 용마루 부위에 온실 길이방향의 연속형 창틀을 락앤피나 언이나 X형 개폐암으로 개폐하는 프로젝트방식을 많이 사용하고 있다. 환기구조에 따른 환기효과는 개폐각이 큰 양지붕형 온실 환기창이 11.7회/h로 아치형 온실 환기창의 7.4회/h보다 높으며, 지중전열량은 비슷하였고 일사량은 아치형이 1.2% 정도 더 투과되는 것으로 나타났다(Kim 등, 1996). 그리고 천창과 측창의 면적이 같을 때의 환기성능이 최대이며, 측창이 없고 천창만 설치한 경우는 환기성능이 1/3로 줄어든다고 하였으나(Lee 등, 1998), 일반적으로 3연동 이상의 대형 연동형 온실에서는 측창 환기보다는 천창 환기에 의해 환기가 이루어지게 되므로 천창 환기면적을 최대한 확

할 수 있는 온실 구조 설계에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 곡부를 힌지로 하고 용마루 부위를 개방하여 지붕면 전체를 양쪽으로 들어올려 개방하는 Retractable Roof 형태의 Futura 온실과 용마루 부위를 힌지로 하고 벽을 따라 안쪽으로 이동시켜 지붕면을 완전 개방하는 Cabriolet 온실 등 환기면적을 극대화시킨 형태의 온실이 개발되었다. 일반적으로 환기창 면적률은 유리온실이 19~25%, 베로온실이 24~28% 정도이나 본 연구에서는 환기창 면적률이 50% 정도인 패널 굴절방식의 환기창 온실을 설치하고 환기효과를 조사하였다.

재료 및 방법

1. 패널굴절방식 환기창 설계

1.1. 패널굴절방식 환기창의 구조

패널굴절방식 측창은 지면에 가까운 쪽의 패널 하부에 절점을 두고 패널 상부가 측고 부위로부터 가이드 레일을 따라 하향하도록 구성하여 창이 개방되게 하였고, 천창은 측고 부위에 절점을 두고 용마루 쪽의 패널 상부가 가이드 레일을 따라 경사진 지붕면을 따라 하향하도록 구성하여 고온 공기층이 정체되어 있는 온실 상부인 측고 부위와 용마루 부위가 개방되도록 하였다. 환기창 개방에 따른 외부 공기 유입은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 상부 패널의 가이드 레일부가 X 방향으로 $X=L(1-\cos\theta)$ 만큼 개방되면서 개방형태의 환기가 이루어짐과 동시에 굴절패널의 절점이 Y 방향으로 $Y=L/2 \times \sin\theta$ 만큼 개방되면서 측면을 통한 환기가 이루어지도록 하였다. 환기면적률은 고정패널과 굴절패널이 교대로 설치되므로 50%를 확보할 수 있었고, 환기창의 개폐는 모터로 회전축의 곡선운동을 랙과 피니언을 이용하여 직선운동으로 변환해 작동할 수 있도록 하였다.

2. 실험온실 설치

실험온실은 Table 1에서 보는 바와 같이 폭 6 m,

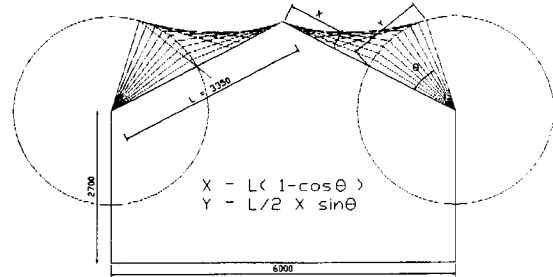


Fig. 1. Opening locus of roof ventilation.

측고 2.7 m, 동고 4.3 m, 길이 21 m의 단동형 실험용 온실을 동서동으로 설치하여 측면에 2,400×1,485 mm, 지붕에 3,350×1,485 mm 크기의 고정패널과 굴절패널을 교대로 조립하여 측창과 천창을 설치하였으며, 온실 벽면과 지붕면의 중앙지점을 절점으로 하여 패널이 굴절되도록 하였다. 창틀의 하부를 힌지로 고정하고 개폐 모터의 회전운동을 랙앤피니언(rack & pinion)의 직선운동으로 변환함으로써 환기창이 굴절 방식으로 개폐되도록 하였다. 시험온실의 측창 굴절각은 0~29°, 천창은 0~23°의 굴절각으로 작동하도록 설치하였으며, 환기창의 개폐거리는 각도에 따라 달라 측창이 0~420 mm, 천창이 0~266 mm가 되도록 하였다. 그리

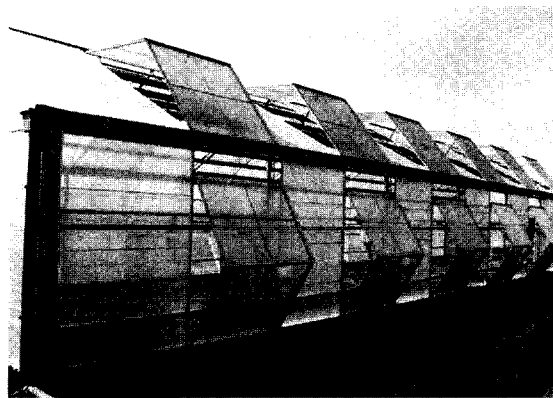


Fig. 2. Outside view of experimental greenhouse.

Table 1. The specification of roof and side vent of experimental greenhouse

Type	Panel size (mm)	Opening degree (°)	Moving distance (mm)	Rate of vent area (%)	Panel type	Operation type
Side vent	2,400×1,485	0~29	0~420	50	Folding panel	Rack & Pinion
Roof vent	3,350×1,485	0~23	0~266	50	Folding panel	Rack & Pinion



Fig. 3. Inside view of experimental greenhouse.

고 Fig. 2와 Fig. 3은 실험온실의 환기창 열림 상태이다.

3. 환기효과 조사

3.1. 환기에 의한 온도하강 효과

실험온실의 환기효과를 조사하기 위하여 환기창을 완전 밀폐하여 온실내 온도를 40°C 이상 상승시킨 후 측창 개방, 천창 개방후 측창 개방, 천·측창 동시개방, 천창 개방 작동에 의한 온실내 온도 하강을 조사하였다. 환기창 개방 시작 후부터 10분간의 온도 변화를 측정하였으며, 실험온실 가운데 부분에 작물 군락의 하부 지점인 0.8 m, 작물 생육에 가장 중요한 영향을 미치는 생장점 위치인 1.2 m, 작물 재배 유효공간의 상부인 2.4 m, 고온의 상부 공기층인 3.6 m 지점에 온도센서(Thermocouple T-type)를 각각 1점씩 설치하고 외부에 1점을 설치하여 외부온도에 대한 온실내 온도변화를 측정하였다. 또한 온실내 온도의 수직분포 및 수평분포를 측정하기 위해 온도센서를 수직단면에 대해 9점 설치하고 수평단면에 대해서는 1.2 m 높이에 9점을 설치하여 다점 데이터 로거(SOLAC-V NP092)로 각 지점의 온도를 측정하였다. 그리고 와이드스판형보다 자연환기 성능이 좋은 벤로형 온실(폭 12.6 m, 길이 20 m)과 천창 환기효과를 비교실험 하였다.

3.1.2. 환기횟수의 측정

굴절패널방식 환기창의 환기횟수를 계산하기 위해 온실내부 상면으로 흡수되는 일사량은 공기흐름에 의한 환기전열량, 벽면을 통해 유출되는 벽면관류열량, 지표면으로 흡수되는 지중전열량의 합과 같다는 열수

지법에 의해 환기횟수를 산출하였다.

$$S_n = V + H + B \quad (1)$$

여기서, S_n : 상면 흡수 일사량 ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
 V : 환기전열량 ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
 H : 벽면관류열량 ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
 B : 지중전열량

S_n 은 온실내부로 유입되는 일사량 S_n 과 상면에서 반사되는 일사량 S_r 의 차로 나타낼 수 있다.

$$S_n = S_h - S_r \quad (2)$$

여기서, S_n : 상면 흡수 일사량 ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
 S_h : 온실내부 유입 일사량 ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
 S_r : 상면 반사 일사량 ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)

식 (1.1)에서 환기전열량 V 는

$$V = q_s(i_i - i_o) \quad (3)$$

여기서, V : 환기전열량 ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
 q_s : 중량환기율 ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
 i_i, i_o : 온실 내·외부 엔탈피 ($\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$)

식 (1.1)에서 벽면관류열량 H 는

$$H = k(t_i - t_o)\beta \quad (4)$$

여기서, H : 벽면관류열량 ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
 k : 열관류율 ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)
 t_i, t_o : 온실 내·외부 온도 (°C)
 β : 상면적에 대한 벽면적의 비 ($\beta \geq 1$)

식 (1)에 식 (2)~(4)를 대입하면 중량환기율 q_s

$$q_s = \frac{S_h - S_r - B - k(t_i - t_o)\beta}{(i_i - i_o)} \quad (5)$$

온실의 체적을 기준으로 한 용량환기율 q 는

$$q = \frac{q_s}{\tau_o} \quad (6)$$

여기서, q : 용량환기율 ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
 τ_o : 외부 공기의 비중량 ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)
 환기횟수 N 은

$$N = \frac{q}{h} \quad (7)$$

여기서, N : 환기횟수 ($\text{회}\cdot\text{h}^{-1}$)

h : 온실의 평균높이 (m)

로 나타낼 수 있다.

온실내부로 유입되는 에너지는 데이터 로거(Data logger LI-1000, Licor)를 이용하여 알베도메타(Albedometer, EKO-MR-22)와 순방사계(Net Pyrradiometer, EKO-MF11)로 시간당 누적값을 측정하였으며, 지중으로 전달되는 에너지를 측정하기 위해 지중전열계(Heat Flow Sensor, EKO-MR22)를 사용하였다. 또한 데이터 기록용 온·습도계(HOBO H08, Onset computer corp.)로 건구온도와 상대습도를 측정하여 프로그래밍 언어인 Fortran으로 작성한 습공기선도(Psychrometric Chart) 프로그램 PSYCH를 이용하여 온실 내·외부의 엔탈피를 계산하여 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 환기효과

1.1. 측창 및 천창 개방에 따른 온실내 온도하강 효과
봄부터 가을까지 일사량이 많은 날에 차광 및 환기를 하지 않는다면 온실내 기온은 40~50°C 정도로 올라가 정상적인 작물재배가 곤란하기 때문에 측창 및 천창을 통한 자연환기효과를 최대한 높여 온실내 기온을 외부와 비슷하게 유지할 수 있도록 하여야 한다.

측창과 천창을 이용한 환기효과는 특히 온실의 연동수에 따라서 크게 달라지게 되므로 이러한 상황을 고려하여 각각의 효과를 측정하였다.

(1) 측창 개방에 의한 온도 하강효과

측창의 환기효과를 조사하기 위해 실험 온실을 완전히 밀폐하여 온실내 온도를 40°C 이상 상승시킨 후, 측창을 개방해 온실내 온도의 하강속도를 조사하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 실험온실의 환기창 열림 시간은 약 4분 정도 소요되었으며, 온도환경의 영향이 일반적 작물의 성장점 부위인 1.2 m 지점과 작물 식재 하부인 0.8 m 지점의 온도는 측창이 완전히 열린 상태가 되기 1분 전부터 하강하기 시작하여 2분 후부터는 외기온과의 온도차 2~3°C 정도까지 하강하여 평형상태로 유지되었고, 온실내 측고 부위인 2.4 m 지점의 온도는 0.8, 1.2 m 지점보다 창개방 면적이 상대적으로 적어 온도가 하강하기 시작하는 시점이 1분 정도

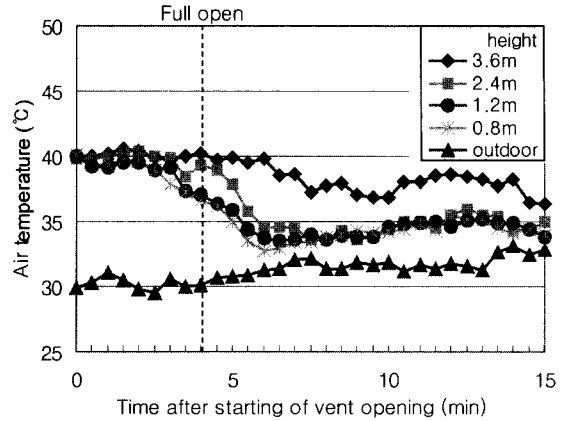


Fig. 4. Temperature descent according to time after opening of side vents starts.

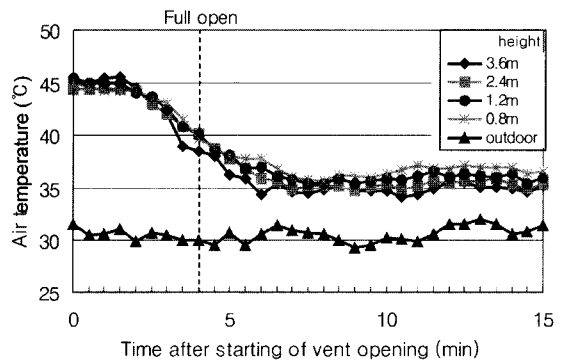


Fig. 5. Temperature descent according to time after opening of roof vents starts.

늦어졌으나 측창 완전개방 2분 후부터는 0.8, 1.2 m 지점과 거의 같은 온도를 유지하면서 평형상태를 이루었다. 상부 고온 공기층을 형성하고 있는 천정 부위 3.6 m 지점에서는 타 지점에 비해 온도 하강속도가 느리고 외부와의 온도차도 큰 것으로 나타났는데, 이는 측창에 의해 외부의 공기가 유입되어 온실 내부 온도를 하강시키고 다시 외부로 유출되는 과정에서 온실내 저온의 유동 공기층과 온실 상부의 고온 공기층이 분리되어 온실내 공기 흐름을 형성하고 있기 때문인 것으로 판단되었다.

(2) 천창 개방에 의한 온도 하강효과

실험 온실은 단동 시설로 설치되었으나 대부분 농가에서는 토지의 이용효율을 높이기 위해 연동형 시설을 선호하는 경향이 있다. 그러나 연동형 시설에서는 3연동 이상의 온실일 경우 측창에 의한 환기효과가 떨어지게

되어 천창에 의한 환기만이 이루어지고, 굴뚝효과에 의해 천창에서 유입된 외부공기는 주변에 영향을 미치지 못하고 상하의 공기흐름만 형성된다. 따라서 다연동 시설에서는 천창에 의한 환기효과가 매우 중요하다.

Fig. 5는 천창만의 환기효과를 나타내기 위하여 단동형인 시험온실에서 측창을 밀폐하고 천창 환기만으로 온도하강효과를 측정된 것이다. 높이별 각 지점은 천창이 개방되기 시작한 2분 후부터 온도가 하강하기 시작하였고, 완전 개방된 후 2분 후부터는 외기온과의 온도차 3~4°C 정도를 유지하면서 평형 상태에 도달하였다. 천정 부위인 3.6 m 지점의 온도가 천창 개방 후 3분 후에 타 지점에 비해 더 하강하여 각 지점 중 가장 온도가 낮게 유지되었고, 0.8, 1.2, 2.4 m의 온도는 거의 온도차가 없이 같은 경향으로 하강하다가 천창 완전 개방 1분 30초 후에는 높이에 따른 온도 차이가 뚜렷하게 나타나 각 지점별 약 0.5°C 정도의 차이를 유지하면서 평형상태를 이루었다.

(3) 천창 및 측창 동시개방에 의한 온도 하강효과

Fig. 6에서 보는 바와 같이 천·측창의 개방 종료 시점까지 각 지점별 온도 하강 양상은 유사하였으나 개방이 종료된 후부터는 천정부위인 3.6 m 지점과 식물체 상부인 1.2 m 지점은 거의 온도차 없이 유사한 경향으로 하강하였으며, 식물체 하부인 0.8 m 지점은 개방 직전까지는 1.2 m나 2.4 m 지점과 온도차 없이 같은 경향으로 변화하였으나 완전 개방 후부터는 위의 두 지점보다 1~1.5°C 정도 높게 유지되면서 평행상태를 나타냈다. 이것은 천·측창이 완전 개방된 후 양쪽

측창으로부터 유입된 공기의 흐름이 온실 중심부의 0.8 m 지점보다 높은 1.2 m 지점에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 그리고 처마부위인 2.4 m 지점에서는 온도의 변화 폭이 컸는데 이는 측창 개방 시 처마부위가 개방되면서 유입된 외부 공기가 용마루 부위의 개구부로 직접 유출되기 때문인 것으로 판단되었다.

1.2. 천창 개방에 따른 환기횟수

기존의 연속형과 분산형 천창의 환기횟수는 일반적으로 10~20회·h⁻¹ 정도인데 비해 패널굴절 방식 천창은 Table 2에서 보는 바와 같이 풍속이 0~0.5 m·s⁻¹ 정도로 적은 경우 환기횟수가 15.2~18.8회·h⁻¹, 풍속이 1.5~3m·s⁻¹ 정도인 경우는 25.3~39.3회·h⁻¹로 높게 나타났다. 이는 환기창의 측면 유효환기면적이 연속형과 분산형 천창보다 넓고 처마 부위로 유입된 외부공기가 용마루 부위로 원활하게 유출되기 때문이라고 할 수 있다. Kim 등(2000)은 환기횟수에 따른 포그냉방 실험에서 환기횟수가 증가하고 일정한 풍속이 연속적으로 발생할 때 냉방효율이 증가한다고 하였으며, Nam(2000)은 환기 및 냉방설계를 위한 열평형 모델에서 외기온이 35°C일 때 내부를 32°C로 유지하기 위한 포그시스템에서 3.96 m³·m⁻²·min⁻¹의 환기율이 필요하다고 하였는데 패널굴절방식의 환기창을 이용할 경우에는 냉방효과를 극대화 할 수 있을 것으로 판단된다.

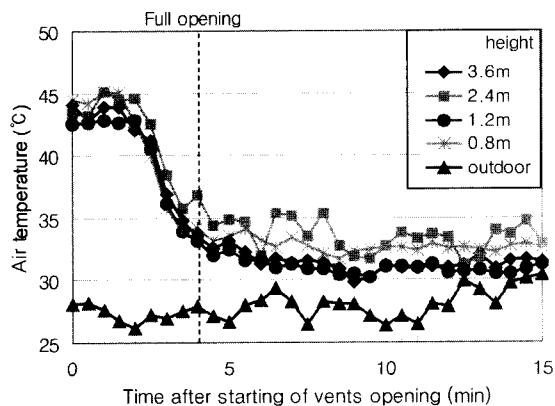


Fig. 6. Temperature descent according to time after opening of side and roof vents starts.

Table 2. Micro climate of experimental greenhouse

Index		Time (Date : 14th. Sep.)			
		11:00	12:00	13:00	14:00
Wind speed (m·s ⁻¹)		1.5	0.5	0	3
Inflow radiation (kcal·m ⁻² ·h ⁻¹)		345.0	239.3	190.4	399.3
Heat transmittance (kcal·m ⁻² ·h ⁻¹)		50.1	26.9	30.4	46.6
Inside	D.B. Temp. (°C)	41.2	42.1	43.9	43.9
	RH (%)	38.6	35.9	30.6	30.6
	Enthalpy (kcal·kg ⁻¹)	21.8	21.8	21.4	21.4
Outside	D.B. Temp. (°C)	33.6	35.4	37.3	36.4
	RH (%)	53.7	47.9	42.3	43.4
	Enthalpy (kcal·kg ⁻¹)	19.0	19.2	19.5	19.0
Ventilation amount (kg·m ⁻² ·h ⁻¹)		70.7	52.0	41.9	108.7
Volumic ventilation (m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹)		60.6	45.1	36.4	94.3
Air exchange rate (No·h ⁻¹)		25.3	18.8	15.2	39.3

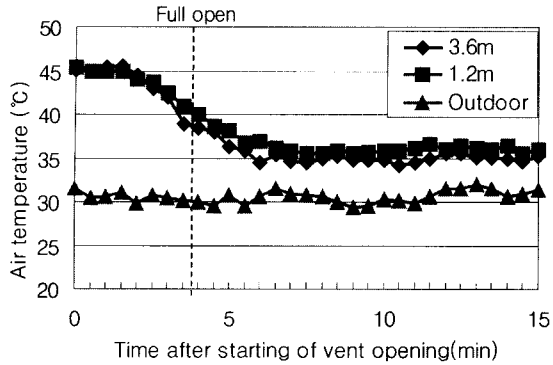


Fig. 7. Temperature descent of folding panel type greenhouse.

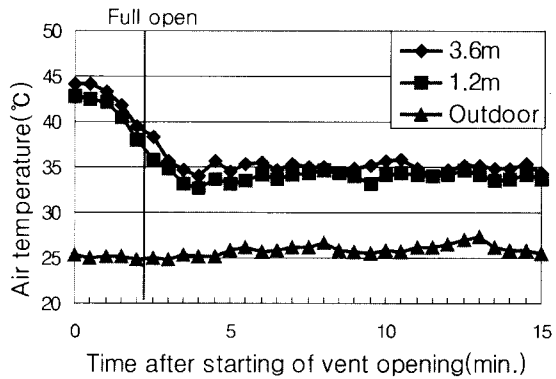


Fig. 8. Temperature descent of venlo type greenhouse

1.3. 패널굴절식과 벤로형 온실의 온도하강 효과 비교
 패널굴절식 환기창 온실과 벤로형 온실의 천창개폐 시 온도하강을 비교하였을 때 Fig. 7과 8에서 보는 바와 같이 패널굴절식 환기창 온실의 실온은 외기온에 비해 3~4°C 정도 높았으나 벤로형 온실은 7~8°C 정도 높게 나타나 패널굴절식 환기창 온실의 환기효과가 2배 이상 높았다. Kim 등(2000)은 환기시간 보다 환기창의 개방량에 따라 환기량은 결정된다고 하였으므로 기존 온실의 환기창 보다 환기창 개방면적이 2배정

도 많은 패널굴절식 환기창 온실이 환기효과가 높게 나타난 것으로 판단된다.

Literature cited

1. Boulard, T., A. Baille. 1993. A Simple Greenhouse Climate Control Model Incorporating Effects of Ventilation and Evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology* 65:145-157.
2. Kim, H.H., S.Y. Lee, H. Chun, Y.I. Nam, and Y.S. Kwon. 1996. Improvement of ventilation method in greenhouse. Rep. of NHRI, RDA 96:538-540 (in Korean).
3. Kim, J.H., C.S. Kim, G.H. Koo, and K.M. Lee. 1995. Fundamental Study for the Automatic control system in greenhouse using microcomputer(III). *J. Kor. Soc. Agr. Mac* 20(2):162-172 (in Korean).
4. Kim, M.K., K.S. Kim, and H.J. Kwon. 2000. The cooling effect of fog cooling system as affected by air exchange rate in natural ventilation greenhouse. *J. Bio. Env. Con.* 10(1):10-14 (in Korean).
5. Lee, G.M. 1994. Management during hot season of fruit production in greenhouse. *the Korean Res. Soc. for Protected Hor.* 7(2):23-31 (in Korean).
6. Lee, S.G., H.W. Lee, Y.H. Kim, J.H. Lee, J.W. Lee, H.S. Nam, Y.C. Yoon, and W.M. Seo. 1998. Optimum design of greenhouse structure for efficient environment control and energy saving. MAF report: 126-133 (in Korean).
7. Nam, S.W., 2000. Application of heat balance model to design of ventilation and cooling greenhouses. *J. Bio. Env. Con.* 9(4):201-206 (in Korean).
8. Suh, W.M. and Y.C. Yoon. 1996. Analysis of greenhouse thermal environment by model simulation. *J. Bio. Fac. Env.* 5(2):215-235 (in Korean).
9. Taeke de Jong. 1990. Natural ventilation of large multi-span greenhouse. IMAG-DLO report 113.
10. Woo, Y.H., J.M. Lee, and Y.I. Nam. 1995. Forced ventilation number of air changes to set point of inside air temperature in summer glasshouse. *J. Bio. Fac. env.* 4(2):223-231 (in Korean).

패널굴절방식 환기창 온실의 환기효과

김진영* · 이시영¹ · 김현환¹ · 전 희¹ · 윤인학²

*농업기계화연구소 생물생산기계과, ¹원예연구소, ²코아엔지니어링

적 요

본 연구는 여름 같은 고온기나 외부온도가 높지 않아도 시설내 온도가 많이 상승하는 봄·가을 같은 시기에 온실내 고온 공기를 외부로 신속하게 유출시켜 강제환기를 사용하지 않고도 온실내부의 환경을 조절할 수 있는 새로운 자연 환기창을 개발하는데 목적을 두고 수행하였다. 패널굴절방식 측창은 지면에 가까운 쪽의 패널 하부에 절점을 두고 패널 상부가 측고 부위로부터 가이드 레일을 따라 하향하도록 구성하여 창이 개방되게 하였고, 천창은 측고 부위에 절점을 두고 용마루 쪽의 패널 상부가 가이드 레일을 따라 경사진 지붕면을 따라 하향하도록 구성하여 고온 공기층이 정체되어 있는 온실 상부인 측고 부위와 용마루 부위가 개방되도록 하였다. 굴절 패널의 상부 개방거리는 $X=L(1-\cos\theta)$ 로 나타낼 수 있고 측면 개방 거리는 $Y=L/2 \times \sin\theta$ 로 나타낼 수 있다. 천창 개방시간은 4분 20초 소요되었으며 개방 시작한 2분 후부터 온도가 하강하기 시작하였고, 완전 개방 2분 후부터는 외기온과의 온도차 3~4°C 정도를 유지하면서 평형상태를 유지하였다. 패널굴절방식 환기창 온실의 환기성능은 체적환기량이 22.3~94.3 $m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 이었으며, 환기횟수는 15.2~39.3회·h⁻¹로 나타나 일반적인 연속형 천창의 10~15회·h⁻¹ 정도에 비해 환기효과가 높은 것으로 나타났다. 그리고 벤로형 온실과의 천창개폐시 온도하강을 비교하였을 때 환기효과가 2배 이상 높은 것으로 판단되었다.

주제어 : 양지붕형, 온실, 환기창, 자연환기