

소형풍동을 이용한 단동 비닐온실의 열손실 분석

김영화 · 김형권 · 이태석 · 오성식 · 유영선*

국립농업과학원 농업공학부 에너지환경공학과

Analysis on Heat Loss of Single-span Greenhouse Using Small-scaled Wind Tunnel

Young Hwa Kim, Hyung kow Kim, Tae suk Lee, Sung sik Oh, and Young sun Ryou*

Energy & Environmental Engineering Division, NAAS, RDA, Jeonju 54875, Korea

Abstract. The objective of this study is to analyze the heat transfer loss of covering materials in a single-span plastic greenhouse under the steady-state wind environment. To achieve this objective, the following were conducted: (1) design of a small-scaled wind tunnel (SCWT) to analyze heat losses of the greenhouse and its performance; (2) determination of the overall heat transfer coefficient (OHTC) for the covering materials using a small-scaled greenhouse model. The SCWT consists of the blowing, dispersion, steady flow, reduction and testing areas. Each part of the SCWT was customized and designed to maintain air flow at steady state and to minimize the variances in the SCWT test. In this study, the OHTCs of the covering materials were calculated by separating each with the roof, side wall, front and back of the small-scaled greenhouse model. The results of this study show that the OHTC of the roof increases as wind speed increases but the zones in which the increase rate of the OHTC decreased, were distinguished by wind tunnel wing speed of 2 ms^{-1} . For the side wall, the increase rate of the OHTC was particularly higher in the $0\text{-}1 \text{ ms}^{-1}$ zone.

Additional key words : covering materials, overall heat transfer coefficient, surface temperature, wind direction

서 론

국내 난방온실 재배면적은 2007년 10,210ha에서 2017년 15,850ha로 55.2% 증가하였으며 2017년 기준 전체 온실재배면적의 34.7%를 차지한다(MAFRA 2007, 2017). 난방온실 경영비 중 난방비가 차지하는 비율은 주요작목 기준 24.7~39.2% 범위에 분포하고 있으며 경영비 요인 중 가장 높은 비중을 차지하고 있다(RDA, 2015). 난방온실의 난방비는 난방부하와 밀접한 관련이 있으며 난방부하는 온실 피복재의 관류전열손실, 토양전열손실, 복사열손실, 틈새환기로 인한 열손실 등으로 구성된다. 이중 온실 피복재의 관류전열손실은 전체 열손실의 60~100%를 차지하는 주요한 인자이며 전도전열손실과 대류전열손실로 구성된다(Japan Protected Horticulture Association, 1994; Diop 등, 2014; Hwang 등, 2013; Lee 등, 2011).

이론적 관점에서 대류전열계수는 Nusselt number와 특성 길이의 곱에 유체열전도도를 나눈 값으로 산출되며, Nusselt

number는 Reynolds number와 Prantle number의 곱으로 구성되어있다. Reynolds number는 관성력 대비 점성력을 나타내는 무차원 수이며 관성력은 유체유속과 대상물체 길이의 곱이므로 대류전열계수는 기타 상수값이 일정할 때에 유체 유속에 따라 직선적으로 변화한다.

실험적 관점에서 온실피복재의 관류전열계수는 풍속이 증가함에 따라 관류전열계수는 증가하고 피복재의 표면온도는 감소한다(Hwang 등, 2013). Hot box 실험장치를 이용하여 온실 피복재의 관류전열계수를 산정할 때에 풍속 5m/s 범위에서 풍속과 온도차에 따라 산정식이 달라질 수 있다(Diop 등, 2014). 현장 설치된 온실을 대상으로 풍속에 따른 피복재의 관류전열계수는 증가하나 안정된 값을 도출하기 위해서는 온실 내외부 온도차 범위에서 채택하여야하며 관류전열계수 증가율은 연구자에 따라 큰 차이가 있어 구체적인 환경에 따른 제시가 필요하다(Lee 등, 2011).

따라서 온실의 열손실을 산정함에 있어 외부 풍속은 난방부하 중 피복재 관류전열손실과 밀접한 관련이 있으며, 이에 따른 실험연구가 필요하나 현장 설치된 온실을 대상으로 실험할 때에 풍속과 풍향범위가 일정하지 않고 제한적일 수 있어 일정한 풍환경을 조성할 수 있는 풍동실험을 수행하는 것이 필요하다.

*Corresponding author: ysryou@korea.kr

Received July 22, 2019; Revised January 08, 2020;

Accepted January 20, 2020

본 연구는 일정한 풍환경하에 온실 피복재 관류전열손실을 분석하기 위하여 온실 열손실 분석용 소형 풍동을 제작하고 그 성능을 분석하였으며 모형온실을 적용하였을 때의 관류전열손실을 분석하였다.

연구방법

1. 소형풍동 설계 및 제작

본 연구는 풍동을 이용한 온실 피복재의 관류전열손실을 분석하기 위하여 소형 풍동을 설계, 제작하고 그 성능을 분석하였다. 소형 풍동은 시험부 측 공기흐름이 정상상태를 유지하고 편차를 최소화하기 위하여 풍동의 각 요소를 반영하여 구성하였으며 송풍부, 확산부, 정류부, 축소부, 시험부로 구성하였다(Fig. 1). 소형 풍동의 형태는 개방형, 토출식으로 결정하였고, 시험부 규격은 제작하고자 하는 모형온실의 규격과 상사비율, 시험부의 단면 폐쇄율을 감안하여 결정하였다. 시험부 도달 풍속은 상사비율을 감안하여 실제 풍속 20ms^{-1} 까지 적용 가능한 범위로 설정하였다.

송풍부 설계에 있어서 가장 중요한 요소는 최종적으로 시험부에 토출되는 유속을 만족할 수 있는 송풍팬 용량을 결정하는 것이다. 시험부 요구 풍속의 범위는 기상청(날씨누리)에서 제시하는 강풍주의보가 14ms^{-1} 인 점을 감안하여 20ms^{-1} 를 만족할 수 있도록 하였다. 풍속범위에 적용되는 풍속스케일은 일반적으로 농업용 온실 풍동 실험을 수행한 선행연구들이 1/4~1/3을 적용하였다는 점(Kim 등, 2014; Kim 등, 2017; Hwang 등, 2010)을 참고하였고 이에 따라 실제 토출되는 시험부 유속은 6.67ms^{-1} 이상 만족해야 하므로 10ms^{-1} 발휘 할 수

있도록 송풍팬 용량을 결정하였다(5kW , $3,600\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$).

확산부는 송풍팬으로부터 나온 공기 이동 단면적을 증가시킴으로써 기류 속도를 낮추어 정체실의 정류기능을 향상시키는 역할을 한다. 확산비율은 선행 연구결과와 소형풍동인 점을 감안하여 단면비율을 3배로 결정하였다. 확산부를 거친 저속의 기류는 정류부를 통과하게 되는데 정류부의 단면적은 시험부의 4배 크기인 $1.7\text{m}\times 1.7\text{m}$ 로 결정하였다. 정류부 내부에는 흐름의 균질성을 높이기 위하여 격자형태의 관로를 삽입하였으며, 격자의 크기는 일반적으로 $15\sim 20\text{cm}$ 사용하는데 본 연구에서는 격자의 형태를 $15\text{cm}\times 15\text{cm}$ 정사각형으로 결정하였다. 정류부를 거친 공기는 1/4비율로 축소된 축소부를 거치면서 유속이 증가하여 1.7m 관로를 거쳐 시험부에 도달하도록 하였다. 시험부의 크기는 단동 비닐온실 모형 단면적과 폐쇄율을 감안하여 $0.85\text{m}\times 0.85\text{m}$ 로 하였다.

2. 모형온실 구성 및 제작

풍동실험에 적용할 모형은 농업시설 중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 단동 비닐온실을 대상으로 하였다. 모형의 모델은 2008년 농림수산식품부와 농촌진흥청에서 표준 모델로 제안하고 있는 원예특작시설 내재해형 규격설계도 18종 중 하나인 10-단동-2(RDA, 2014)로 선정하였으며 관련 규격은 Table 1과 같다. 모형스케일은 본 실험이 피복재의 열손실 분석 실험인 점과 모형 내부에 열원이 삽입되어야 한다는 점, 소형 풍동의 시험부 단면과 폐쇄율을 고려하여 1/15 비율로 결정하였다. 모형 온실의 피복재는 폴리에틸렌필름 1층으로 피복하였으며, 모형 길이는 60cm 로 설계하였다.

모형온실 내부에는 실제 가온 온실의 난방환경을 재현하고

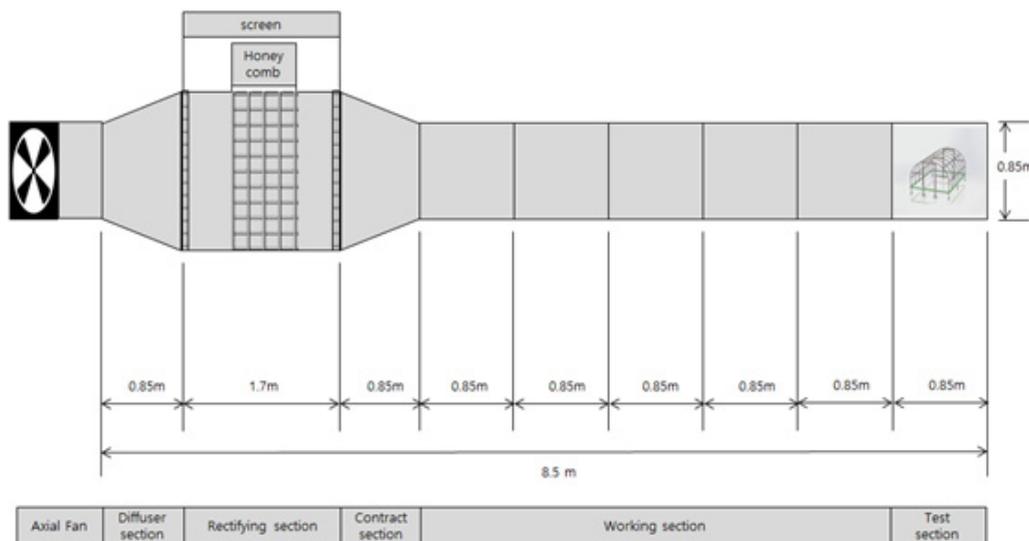


Fig. 1. Design of small-scaled wind tunnel for analyzing heat loss of greenhouse.

Table 1. Specification of greenhouse model.

	Width (mm)	Eaves height (mm)	Ridge height (mm)
Model (10-single-span-2)	7,000	1,400	3,300
Miniature	467	93	220

내외부 온도차를 유지하기 위하여 내부온도 유지장치를 구성하여 설치하였으며, 내부온도 유지장치는 전기히터, 소형팬, 온도조절기로 구성하여 내외부 온도차를 20°C 이상 유지하도록 하였다.

풍속 및 풍향에 따른 피복재의 관류전열손실을 분석하기 위하여 모형배치방향과 소형 풍동내 기류 속도를 변화하게 하였다. 모형배치방향은 소형 풍동의 시험부 길이방향과 모형 온실 길이 방향을 0도 기준으로 하여 반시계 방향으로 30°단위로 회전하여 90°까지 배치하였다. 풍속은 시험부 최측단 평균 풍속을 기준으로 1ms⁻¹에서 5ms⁻¹까지 1ms⁻¹단위로 증분하도록 주파수를 조정하였다. 모형온실 피복재에 관류열량센서(FQA017C, Ahlborn)와 표면온도센서(FPA 686, Ahlborn)를 부착하여 관류열량을 측정하고 관류전열계수를 산출하였으며 표면온도 데이터는 참고자료로 활용하였다. 난방부하는 실험으로 얻은 관류 열 전달계수와 내외부 온도차를 20°C 이상 유지하도록 하였으며, 기타 통계자료를 활용하여 산출하였다.

결과 및 고찰

1. 풍동성능

실험에서 풍동 내부의 평균풍속은 0.48-10.05ms⁻¹ 범위에서 비례적으로 증가하였는데 회귀분석법으로 유추한 선형모델은 식 (1)과 같고 결정계수는 0.9984이었으며 각 풍속별 풍속분포는 Fig. 2와 같다. 또한 band별 분석에서 모든 band가 비례적으로 증가하였으며, 평균풍속 0.48-10.05ms⁻¹ 범위에서 표준편차는 0.0323-0.2365 범위에서 비례적으로 증가하였으며, 평균표준오차는 0.0065-0.0473 범위에서 비례적으로 증가하였다. 또한, band별 분석에서는 (b) band는 (a) band에 비해 평균 0.34-7.14% 범위에서 유속이 빨랐으며, (c) band에 비해서는 0.00-5.82% 범위에서 유속이 빨랐다(Table 2).

$$v_{(0.5-10)}=0.9775x-0.8175, R^2=0.9984 \quad (1)$$

$$v_{(a)}=0.9735x-0.8226, R^2=0.9983 \quad (2)$$

$$v_{(b)}=0.9848x-0.8014, R^2=0.9983 \quad (3)$$

$$v_{(c)}=0.9784x-0.7929, R^2=0.9986 \quad (4)$$

2. 모형온실의 열손실

2.1 풍속에 따른 모형온실의 각 면별 전열계수

소형풍동 내 풍속을 조절함에 따라 나타나는 모형온실 피복재의 관류전열계수는 Fig. 3과 같이 실제풍속으로 표기하였다. 피복재 면은 크게 지붕면과 측벽면(우측, 좌측), 앞뒤면으로 나누고 각 면별 계측 데이터를 평균 내어 산출하였다. 지붕면의 경우 모형온실 배치각도 0°에서 모형풍속 1-2ms⁻¹ 구간에서 전열계수가 5.67W·m⁻²·K⁻¹에서 6.29W·m⁻²·K⁻¹로 11% 증가하였고, 풍속 2-3ms⁻¹ 구간에서 전열계수가 6.30W·m⁻²·K⁻¹에서 6.55W·m⁻²·K⁻¹로 4% 증가하였다. 모형온실 배치각도 30°에서 풍속 1-2ms⁻¹ 구간에서 전열계수가 6.34W·m⁻²·K⁻¹에서 7.24W·m⁻²·K⁻¹로 14% 증가하였고, 풍속 2-3ms⁻¹ 구간에서 전열계수가 7.24W·m⁻²·K⁻¹에서 7.82W·m⁻²·K⁻¹로 8% 증가하였다. 배치각도 60°에서는 풍속 1-2ms⁻¹ 구간에서 전열계수가 6.18W·m⁻²·K⁻¹에서 7.64W·m⁻²·K⁻¹로 24% 증가하였고, 풍속 2-3ms⁻¹ 구간 이후부터는 비슷한 수준이었다. 배치각도 90°에서는 풍속 1-2ms⁻¹ 구간에서 전열계수가 6.68W·m⁻²·K⁻¹에서 8.03W·m⁻²·K⁻¹로 20% 증가하였고, 풍속 2-3ms⁻¹ 구간 이후부터는 비슷한 수준이었다. 풍속이 증가함에 따라 전열계수도 증가하나 증가폭이 감소하는 구간은 풍속에 따라 1-2ms⁻¹과 2-3ms⁻¹으로 구분되어지는 것으로 판단되었다. 측벽면의 경우 모형온실 배치각도 0°에서 풍속 1-2ms⁻¹ 구간에서 전열계수가 5.16W·m⁻²·K⁻¹에서 5.66W·m⁻²·K⁻¹로 10% 증가하였고, 풍속 2-3ms⁻¹ 구간 이후부터는 비슷한 수준이었다. 모형온실 배치각도 30°에서는 풍속 1-2ms⁻¹ 구간 이후부터 비슷한 수준이었으며, 배치각도 60°, 90°에서는 풍속 2-3ms⁻¹ 구간 이후부터는 비슷한 수준이었다. 전열계수가 증가하는 폭이 큰 구간은 0-1ms⁻¹ 구간인 것으로 판단된다.

2.2 풍속에 따른 모형온실의 각 면별 표면온도

소형풍동 내 풍속을 조절함에 따라 나타나는 모형온실 피복재의 표면온도 변화는 Fig. 4와 같다. 지붕면의 경우 모형온실 배치각도 0°에서 풍속 0-1ms⁻¹ 구간에서는 39.2°C에서 33.2°C로 15% 감소하였고, 풍속 1-2ms⁻¹ 구간 이후부터는 비슷한 수준이었다. 모형온실 배치각도 30°에서 풍속 1-2ms⁻¹ 구간에서 40.3°C에서 36.2°C로 10% 감소하였고, 이후 구간에서는 비슷한 수준을 유지하였다. 배치각도 60°에서는 풍속 1-2ms⁻¹ 구간에서 39.4°C에서 37.3°C로 5% 감소하였고, 풍속 2-3ms⁻¹ 구간에서는 37.3°C에서 33.8°C로 9% 감소하였다. 배치각도 90°에서는 풍속 2-3ms⁻¹ 구간에서 42.1°C에서 39.8°C로 5% 감

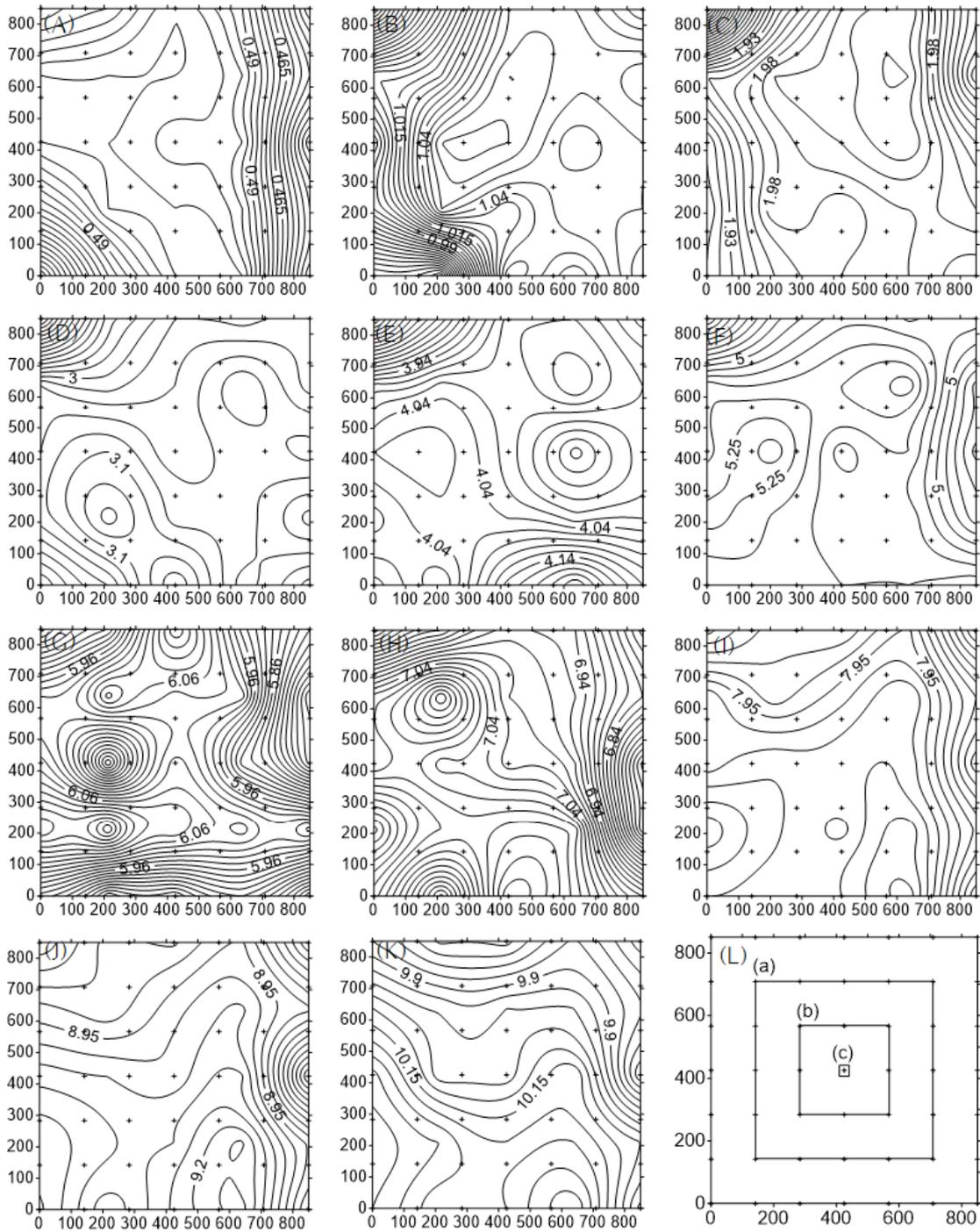


Fig. 2. Grid values maps of velocity distribution at 25 points of wind tunnel, (A) 0.48 ms^{-1} , (B) 1.02 ms^{-1} , (C) 1.96 ms^{-1} , (D) 3.04 ms^{-1} , (E) 4.01 ms^{-1} , (F) 5.09 ms^{-1} , (G) 5.94 ms^{-1} , (H) 6.99 ms^{-1} , (I) 7.96 ms^{-1} , (J) 8.98 ms^{-1} , (K) 10.05 ms^{-1} , and (L) point band (a), (b), and (c) of wind velocity measurement position.

소하였고, 풍속 $3\text{-}4\text{ms}^{-1}$ 구간에서는 39.8°C 에서 37.6°C 로 6% 감소하였다. 전열계수가 감소하는 폭이 크게 발생하는 구간은 풍속별로 차이가 있는 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 일정한 풍환경하에 온실 피복재 관류전열손실을 분석하기 위하여 온실 열손실 분석용 소형 풍동을 제작하고

Table 2. Analysis of mean wind speed values at 25 point of wind tunnel.

	Wind speed (ms ⁻¹)				Standard deviation	Standard error of mean
	Mean	Mean of point band				
		(a)	(b)	(c)		
(A)	0.48	0.47	0.51	0.50	0.0323	0.0065
(B)	1.02	1.01	1.05	1.06	0.0443	0.0089
(C)	1.96	1.94	2.00	2.00	0.0606	0.0121
(D)	3.04	3.02	3.08	3.04	0.0846	0.0169
(E)	4.01	4.01	4.02	4.01	0.1048	0.021
(F)	5.09	5.04	5.19	5.07	0.1767	0.0353
(G)	5.94	5.90	6.03	6.05	0.163	0.0326
(H)	6.99	6.95	7.07	7.01	0.1605	0.0321
(I)	7.96	7.91	8.06	8.08	0.1933	0.0387
(J)	8.98	8.94	9.07	9.01	0.1992	0.0398
(K)	10.05	10.02	10.12	10.02	0.2365	0.0473

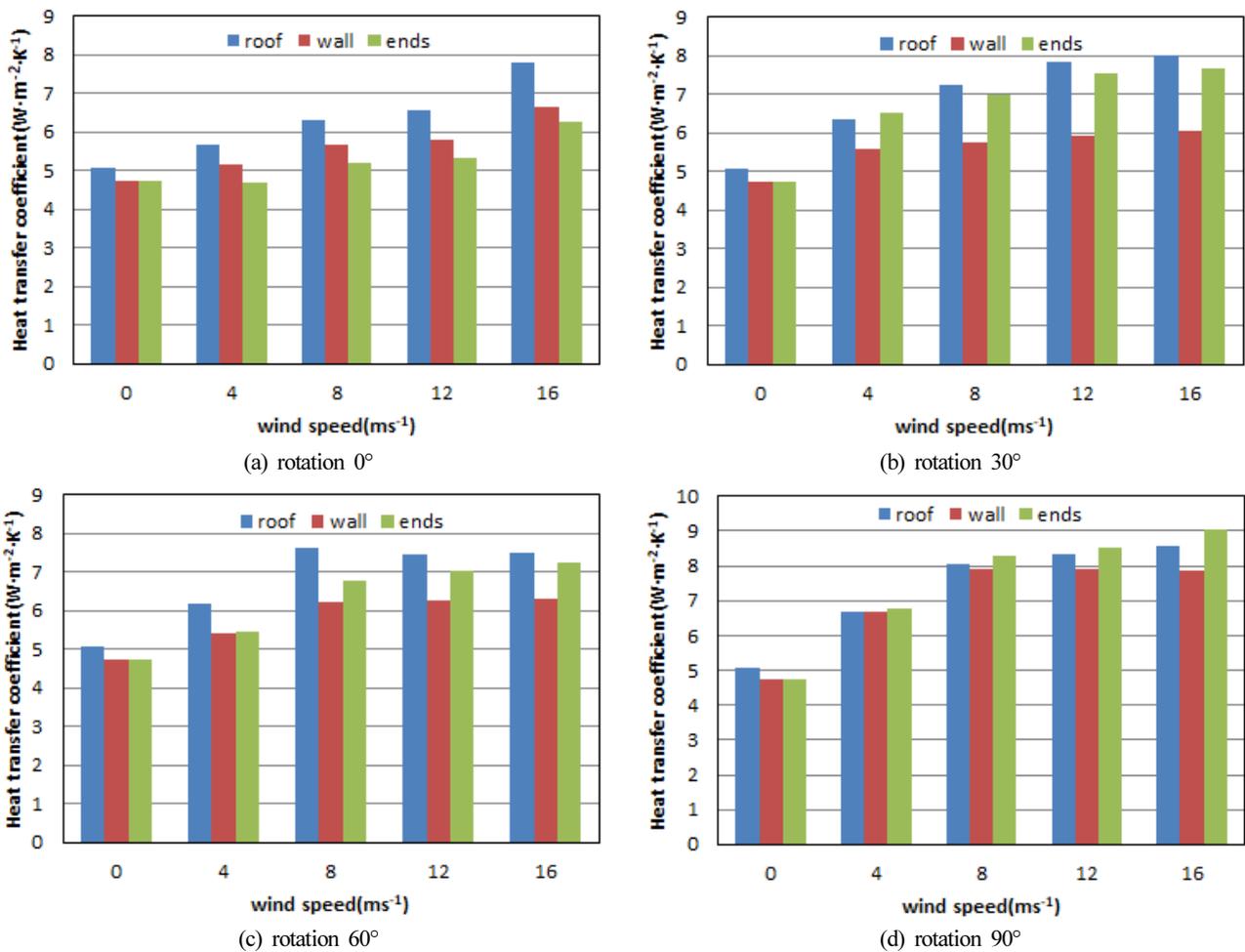


Fig. 3. Heat transfer coefficient of greenhouse miniature covering materials due to the wind speed.

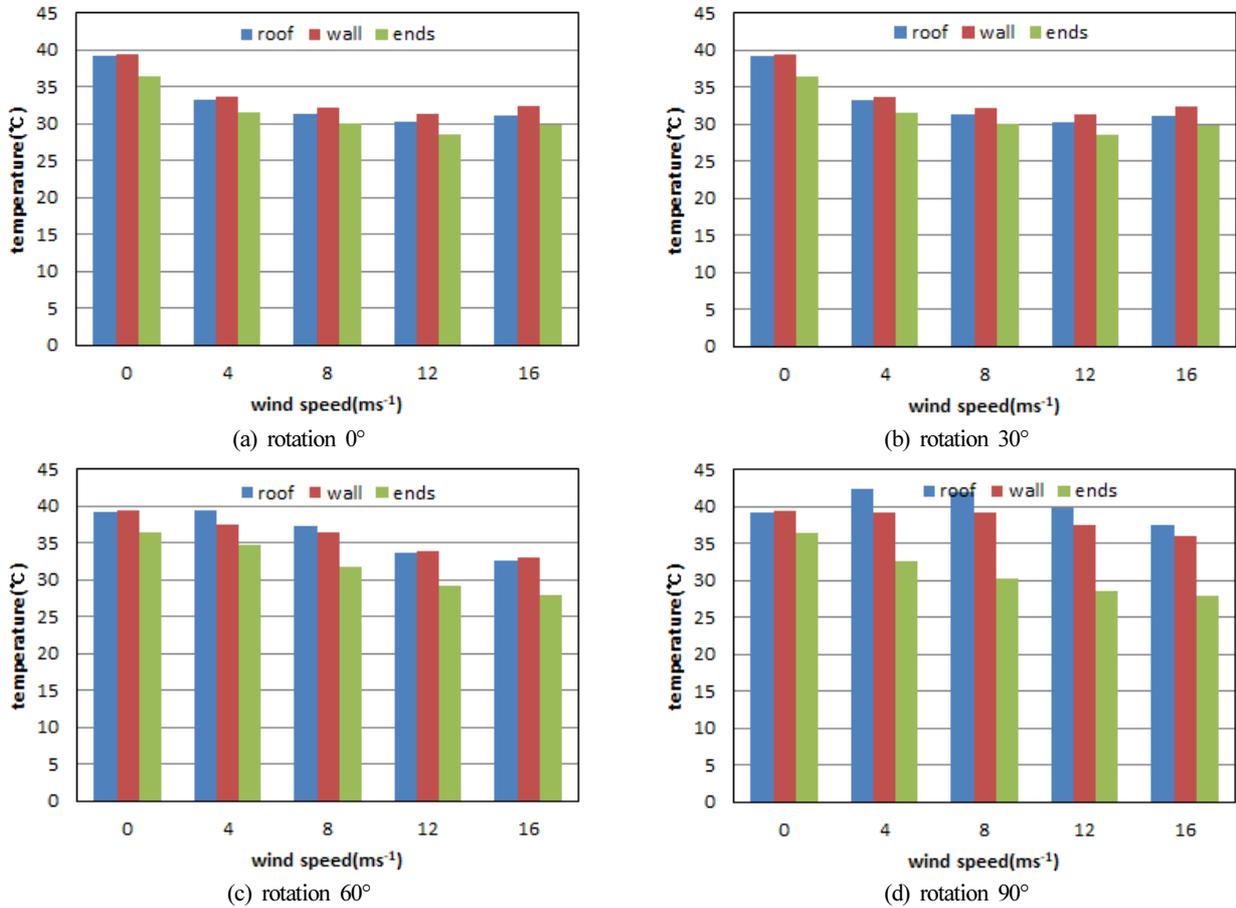


Fig. 4. Surface temperature of greenhouse miniature covering materials due to the wind speed.

그 성능을 분석하였으며 모형온실을 적용하였을 때의 관류전 열손실을 분석하였다. 소형 풍동은 시험부 측 공기흐름이 정상상태를 유지하고 편차를 최소화하기 위하여 풍동의 각 요소를 반영하여 구성하였으며 송풍부, 확산부, 정류부, 축소부, 시험부로 구성하였다. 소형 풍동의 형태는 개방형, 토출식으로 결정하였고, 시험부 규격은 제작하고자 하는 모형온실의 규격과 상사비율, 시험부의 단면 폐쇄율을 감안하여 결정하였다. 상사비율을 풍동실험에 적용할 모형은 농업시설 중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 단동 비닐온실을 대상으로 하였다. 소형풍동 내 풍속을 조절함에 따라 나타나는 모형온실 피복재의 관류전열계수는 피복재 면을 크게 지붕면과 측벽면, 앞뒷면으로 나누고 각 면별 계측 데이터를 평균 내어 산출하였다. 지붕면은 풍속이 증가함에 따라 전열계수도 증가하나 증가폭이 감소하는 구간은 배치각도에 따라 $1\text{-}2\text{ms}^{-1}$ 과 $2\text{-}3\text{ms}^{-1}$ 으로 구분되어지는 것으로 판단되었다. 측벽면의 전열계수가 증가하는 폭이 큰 구간은 $0\text{-}1\text{ms}^{-1}$ 구간인 것으로 판단된다.

추가 주제어 : 열전달계수, 표면온도, 풍향, 피복재

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 연구개발사업(과제 번호: PJ010959&013530)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Cho, S.G., S.Y. Paek, K.P. You, and Y.M. Kim. 2009. A Study on the distribution of wind pressure coefficient for livestock shed without wall claddings and venlo type glass greenhouse. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 25(8):79-86 (in Korean)
- Diop, S., J.W. Lee, W.H. Na, and H.W. Lee. 2012. Overall Heat Transfer Coefficient Measurement of Covering Materials with Thermal Screens for Greenhouse using the Hot Box Method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(5):1-7.
- Hwang, J.T., K.P. You, and Y.M. Kim. 2010. Comparative

- Analysis on the distribution of wind pressure coefficient in glass greenhouse according to the shape and slope. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 26(9):47-54 (in Korean).
- Hwang, Y.Y., J.W. Lee and H.W. Lee. 2013. Estimation of overall heat transfer coefficient for single layer covering in greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 22(2):108-115 (in Korean).
- Kim, D.W., K.C. Ryu, and S.J. JU. 2014. Estimation of wind pressure coefficients on peach-type greenhouse according to roof curvature. *Journal of the Wind Engineering of Korea*, 18(4):215-223 (in Korean).
- Kim, R. U., D.W. Kim, K.C. Ryu, K.S. Kwon, and I.B. Lee. 2014. Estimation of wind pressure coefficients on even-span greenhouse built in reclaimed land according to roof slope using wind tunnel. *Protected Horticulture and Plant Factory*. 23(4):269-280 (in Korean).
- Kim, R. W., I.B. Lee, and K.S. Kwon. 2017. Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 1: Development of the CFD model. *Biosystems Engineering*. 164:235-256.
- Lee, H. W., D. Souleymane, and Y.S. Kim. 2011. Variation of the overall heat transfer coefficient of plastic greenhouse covering material. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 20(2):72-77 (in Korean).
- Lee, J. W., D.K. Kim, and H.W. Lee. 2015. A Numerical Study for Calculation of Overall Heat Transfer Coefficient of Double Layers Covering and Insulation Material for Greenhouse. *Current Research on Agriculture and Life Sciences*, 33(2):41-47.
- Lee, M. Y., I.B. Lee, T.H. Ha, R.W. Kim, U.H. Yeo, S.Y. Lee, G.Y. Park, and J.G. Kim. 2017. Estimation on heating and cooling loads for a multi-span greenhouse and performance analysis of PV system using building energy simulation. *Protected Horticulture and Plant Factory*. 26(4):258-267.
- Lee, S.N., S.J. Park, I.B. Lee, T.H. Ha, K.S. Kwon, R.W. Kim, U.H. Yeo, and S.Y. Lee. 2016. Design of energy model of greenhouse including plant and estimation of heating and cooling loads for a multi-span plastic-film greenhouse by building energy simulation. *Protected Horticulture and Plant Factory*. 25(2):123-132.
- Souleymane, D., J.W. Lee, and H.W. Lee. 2014. Measurement and comparison of overall heat transfer coefficients for greenhouse covering materials with thermal screens. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*. 56(4): 41-51 (in Korean).