공기막 이중필름의 공기막 두께와 주입공기 온도에 따른 관류전열량 변화 특성

Characteristics of Heat Transmission Variation by Air Space Thickness and Injected Air Temperature in Air-Inflated Double Layers Film

김형권^{*†} · 전종길^{*} · 백이^{*} · 이상호^{*} · 윤남규^{**} · 유주열^{***}

Kim, Hyung-Kweon · Jeon, Jong-Gil · Paek, Yee · Lee, Sang-Ho · Yun, Nam-Kyu · Yoo, Ju-Yeol

ABSTRACT

This study was carried out to provide a valuable reference which could reduce heating loss of air-inflated double PO film. Therefore, this study was aimed to choose the best air space thickness and injected air temperature. The characteristics of heat transmission variation at experimental materials were measured and analysed in the laboratory. The experiment was conducted of two layers of PO film, each 0.15 mm thick, sandwiching 110, 175, 225 mm of inflated air with 1 m sides. Environmental control lab was constantly controlled with -10°C and experiment chamber was constantly changed with 0, 5, 10, 15 $^{\circ}\text{C}$. The analysis of heat transfer showed that heat transmission does not have a direct correlation with Air Space thickness and injected air temperature. But when inside and outside temperature difference of chamber was great, supply of outside air to Air Space had an advantage at reduction of heating load. It was required to examine accurate analysis at a real greenhouse.

Keywords: air-inflated double layers film; air space thickness; heat transmission; injected air temperature

I. 서 론

최근 온실 내 가온면적이 증가하고 난방비가 시설원에 경영비의 35~40 %를 차지함에 따라, 난방비 절감이 시설원예농업의 경쟁력 확보를 위해 매우 중요하다 (RDA, 2009). 시설원예농업의 난방비 절감을 위한 근본적인 대책은 수입 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지의 개발이지만, 현실적인 대책으로 온실의 열손실을 진단 평가하여 개선방안을 제시하거나, 필름, 부직포, 알루미늄스크린, 다겹보온커튼 등의 품질을 개선하는 방안이 적극 활용되어 왔다 (Moon et al., 2010; RDA, 2009; Lee et al., 2007). 그러나 이러한 노력에도 불구하고 시설원예농업의 난방비 절감에는 한계가 있어, 최근에는 공기막 이중피복 방식에 대한 연구가 국내외에서 활발히 이루어지고 있다 (Lee et al., 2009a, 2009b, 2010). 공기막 이중피복 방식은 기존의 이중

피복 방식에 비해 두 피복층 사이의 공기층을 완전히 밀폐시켜 일정한 압력을 유지하게 함으로써 전체 난방부하 (heating load)의 대부분을 차지하고 있는 관류전열량 뿐만 아니라 (KRC, 1996; Lee et al., 1999) 틈새환기전열량도 줄일 수 있을 것으로 기대되고 있다 (Boodley, 1996; Fang et al., 2007). 이러한 공기막 이중 피복방식의 국내 실용화를 위해 Lee et al. (2010)은 결로와 광투과율의 관점에서 공기막에 반드시 온실 외부공기를 사용할 것을 제안하였다. 그러나 공기막 두께와 주입공기 온도 변화에 따른 관류전열량의 변화를 비교·분석한 사례는 찾아보기 어려웠다.

본 연구는 공기막 이중 PO필름을 대상으로 단열성능 최적화를 위한 공기막 두께와 주입공기 온도에 대한 기초자료를 제공하기 위하여, 공기막 두께와 주입공기 온도 변화에 따른 관류전열량을 측정하고 그 변화 특성을 비교·분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 대상 및 장치

공기막 이중필름은 Fig. 1과 같이 가로, 세로 각각 1 m의 이중 피복 방식으로 제작하였으며, 두 피복층 사이의 공기층이 완전히 밀폐된 공기주입 방식으로 제작하였다. 공기주입 후 공기막의 두

* 국립원예특작과학원 시설원예시험장

** 국립농업과학원 재해예방공학과

*** 화산농건

† Corresponding author Tel.: +81-51-602-2152

Fax: +81-51-971-2024

E-mail: khgweon@korea.kr

2013년 9월 17일 투고

2013년 10월 10일 심사완료

2013년 11월 4일 게재확정

Fig. 1 Shapes of experimental material

께는 일정하게 설정된 값을 유지하도록 하였고, 실험용 피복재는 1, 2중 모두 두께 0.15 mm의 PO필름을 사용하였다.

본 실험에 사용된 냉동실험실과 분석챔버는 Fig. 2와 같으며, 부산시 강동동에 위치하고 있는 시설원예시험장내에 설치되어 있다. 냉동실험실 내부는 $-15 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 범위에서 항온을 유지할 수 있으며, 냉동실험실 내에 두께 100 mm의 발포스티로폼 판으로 가로, 세로, 높이가 각각 1 m인 단위체적 1 m^3 의 실험용 챔버를 제작하여 설치하였다. 정육면체인 챔버의 윗면을 제외한 5면은 발포스티로폼 판으로 단열하고, 내면은 검은색 PE필름으로 코팅하였으며, 각 면의 스티로폼 판이 연결되는 부분은 밀봉하여 공기의 누출이 없도록 제작하였다. 실험대상인 공기막 이중 PO필름을 챔버의 윗면에 부착하여 실험할 수 있도록 구성하였으며, 챔버 내부에 5 kW 용량의 전기온풍기를 설치하여 내부 공기를 직접 가열할 수 있도록 하였다. 전기온풍기는 서미스터 (PTC) 온도센서 및 온도조절기와 연결하여 설정온도를 유지할 수 있도록 하였다.

2. 실험방법

냉동실험실 내부온도는 -10°C 로 고정 설정하였고, 이중 PO필름은 공기막 두께 110, 175, 225 mm 별로 구분하여 실험을 실시하였다. 이때 챔버 내부온도는 0, 5, 10, 15°C 로 구분하였고, 이중 PO필름의 공기막에 챔버 내부공기 0, 5, 10, 15°C 를 주입한 경우와 챔버 외부공기 -10°C 를 주입한 경우에 대하여 관류전열량의 변화를 측정하였다. 또한 단일 PO필름에 대하여 챔버 내부온도별로 관류전열량의 변화를 측정하여 이중 PO필름과 비교·분석하였다. 공기막 두께와 주입공기의 온도 변화에 따른 관류전열량의 분석을 위하여 일본 EKO사의 MF-180M 열관류율 센서를 이용하여 챔버쪽에 접해있는 PO필름과 냉동실험실쪽에 접해있는 PO필름의 관류전열량을 측정하였다. 측정기간은

(a) Environmental control lab

(b) Experimental chamber
(including fan, compressor, control box)

Fig. 2 Pictures of environmental control lab and experimental chamber

2013년 7월 16일부터 8월 14일까지였으며, 측정결과는 평균값을 이용하였다. 측정된 데이터는 일본 Yokogawa사의 MV1000을 사용하여 30초 간격으로 연속 저장하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 공기막 두께에 따른 관류전열량 변화

Fig. 3은 공기막 두께가 110, 175, 225 mm로 변화함에 따른 단위면적 (m^2) 당 관류전열량의 변화를 나타낸 것으로, Fig. 3 (a)는 공기막에 챔버 내부공기, Fig. 3 (b)는 외부공기를 주입했을 때의 변화를 나타내고 있다.

Fig. 3 (a)에서 공기막에 챔버 내부공기를 주입한 경우에 공기막 두께변화에 따른 관류전열량의 변화를 살펴보면, 공기막 두께가 110, 175, 225 mm로 변화할 때 관류전열량은 챔버 내부온

Fig. 3 Heat transmission variation for air space thickness at different temperature of the chamber

도가 0 °C 일 때 22.8, 25.6, 25.0 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 5 °C 일 때 37.4, 48.6, 42.2 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 10 °C 일 때 49.8, 55.7, 55.2 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 15 °C 일 때 65.8, 74.9, 70.1 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 변화하였다. 공기막의 두께가 110 mm에서 175 mm로 두꺼워짐에 따라 관류전열량은 11.7 ~ 29.9 % 범위로 평균 16.5 % 증가하였으며, 공기막 두께가 110 mm에서 225 mm로 두꺼워질 때는 6.6 ~ 12.8 % 범위로 평균 9.4 % 증가하였다. 반면에 175 mm에서 225 mm로 두꺼워질 때는 -13.2 ~ -0.9 % 범위로 평균 6.1 % 감소하였다. 이처럼 공기막 두께 175 mm인 경우가 관류전열량이 가장 많았으며, 175, 225 mm가 110 mm에 비해 관류전열량이 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3 (b)에서 공기막에 챔버 외부공기를 주입한 경우에 공기막 두께가 110, 175, 225 mm로 변화함에 따른 관류전열량은 챔버 내부온도가 0 °C 일 때 28.0, 24.1, 25.0 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 5 °C 일 때 44.5, 42.1, 41.3 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 10 °C 일 때 57.0, 52.4, 52.5 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 15 °C 일 때 72.2, 67.8, 66.8 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 변화하였다. 공기막의 두께가 110 mm에서 175 mm로 두꺼워짐에 따라 관류전열량은 -14.1 ~ -5.3 % 범위로 평균 7.6 % 감소하였고, 110 mm에서 225 mm로 두꺼워짐에 따라 관류전열량은 -10.7 ~ -7.1 % 범위로 평균 8.0 % 감소하였다. 175 mm에서 225 mm로 두꺼워질 때는 내부온도가 0 °C 인 경우는 4.0 %, 10 °C 인

경우는 0.2 % 증가하였으나, 5 °C 인 경우는 2.0 %, 15 °C 인 경우는 1.4 % 감소하여 평균 0.4 % 감소하는 것으로 나타났다.

또한 공기막이 없는 단일필름의 경우 챔버 내부온도가 0, 5, 10, 15 °C로 변화할 때 관류전열량은 46.1, 78.1, 100.6, 125.2 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 나타나, 공기막 두께 110, 175, 225 mm의 이중필름이 단일필름에 비해 관류전열량이 약 37.8 ~ 52.1 % 가량 감소하는 것으로 나타났다. 이처럼 두 피복층 사이의 공기층이 완전히 밀폐된 공기막 이중필름은 온실의 난방부하 감소에 매우 유리한 방식으로 공기막에 챔버 내부공기를 주입한 경우는 110 mm에서 단열성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 공기막 두께가 가장 얇은 110 mm의 경우는 비교적 따뜻한 공기막 유체의 열유동 영향을 가장 적게 받았기 때문인 것으로 판단된다. 반면, 공기막에 챔버 외부공기를 주입한 경우는 225 mm에서 단열성능이 가장 우수한 것으로 분석되었으며, 이는 공기막이 단열재의 역할을 하여 공기막 두께가 두꺼울수록 전도열전달에 불리하게 작용한 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 공기막 두께 110, 175, 225 mm 변화에 따른 관류전열량의 차이는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 매우 작고, 뚜렷한 상관관계를 찾아보기 어려웠다 (Lee et al., 2009b). 향후 온실에서의 추가적인 실험을 통하여 관류전열량 뿐만 아니라 시공성을 고려한 적정 공기막 두께의 추가 규명이 필요한 것으로 판단된다.

2. 주입공기의 온도에 따른 관류전열량 변화

Fig. 4는 공기막의 주입공기 온도변화에 따른 단위면적 (m^2) 당 관류전열량의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4 (a)는 공기막 두께가 110 mm, Fig. 4 (b)는 공기막 두께가 175 mm, Fig. 4 (c)는 공기막 두께가 225 mm일 때의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 4 (a)에서 관류전열량의 변화를 살펴보면, 챔버 외부공기를 주입한 경우가 내부공기를 주입한 경우에 비해 전 구간에서 관류전열량이 많은 것으로 나타났다. 평균 관류전열량은 내부공기 주입의 경우는 44.0 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 외부공기 주입의 경우는 50.4 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 외부공기 주입이 내부공기 주입에 비해 평균 14.7 % 증가하는 것으로 나타났다. 챔버 내부온도가 0, 5, 10, 15 °C로 증가할 때 공기막에 챔버 내부공기를 주입한 경우 관류전열량은 22.8, 37.4, 49.8, 65.8 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 증가하는 것으로 나타났으며, 외부공기를 주입한 경우는 28.0, 44.5, 57.0, 72.2 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 역시 증가하는 것으로 나타났다. 내부공기 대비 외부공기 주입시의 관류전열량 증가율은 챔버 내부온도가 0 °C 일 때 22.7 %로 가장 높았고, 5 °C 일 때 19.0 %, 10 °C 일 때 14.4 %, 15 °C 일 때 9.8 %로 가장 낮아 냉동실험실과 챔버의 온도차가 클수록 관류전열량 증가율은 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4 (b)는 챔버 외부공기를 주입한 경우가 내부공기를 주입

Fig. 4 Heat transmission variation for injected air condition at different temperature of the chamber

한 경우에 비해 전 구간에 걸쳐 관류전열량이 적어 단열성능이 우수한 것으로 나타났다. 공기막에 내부공기와 외부공기를 주입한 경우 평균 관류전열량은 각각 51.2, 46.6 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 외부공기 주입이 내부공기 주입에 비해 평균 9.0 % 감소하는 것으로 나타났다. 챔버 내부온도가 0, 5, 10, 15 °C로 증가할 때 공기막에 챔버 내부공기를 주입한 경우 관류전열량은 25.6, 48.6, 55.7, 74.9 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 증가하였고, 외부공기를 주입한 경우는 24.1, 42.1, 52.4, 67.8 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 역시 증가하였다. 외부공기 주입이 내부공기 주입에 비해 챔버 내부온도 0 °C 일 때 6.1 %, 5 °C 일 때 13.3 %, 10 °C 일 때 5.9 %, 15 °C 일 때 9.5 % 만

큼 관류전열량이 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 4 (c)에서는 챔버 외부공기를 주입한 경우가 내부공기를 주입한 경우에 비해 대체로 관류전열량이 적은 것으로 나타났다. 공기막에 챔버 내부공기를 주입한 경우 평균 관류전열량은 48.1 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 나타났으며, 챔버 내부온도가 0, 5, 10, 15 °C로 증가함에 따라 관류전열량은 25.0, 42.2, 55.2, 70.1 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 증가하였다. 외부공기를 주입한 경우 평균 관류전열량은 46.4 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 나타났으며, 챔버 내부온도 증가에 따라서 관류전열량은 25.0, 41.3, 52.5, 66.8 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 역시 증가하는 것으로 나타났다. 외부공기 주입이 내부공기 주입에 비해 관류전열량이 평균 3.5 % 감소하였으며, 챔버 내부온도가 0 °C 인 경우는 0.2 % 증가하였으나, 5 °C 인 경우는 2.1 %, 10 °C 인 경우는 4.8 %, 15 °C 인 경우는 4.7 % 감소하는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 공기막에 챔버 내부공기 (0, 5, 10, 15 °C) 또는 외부공기 (-10 °C) 주입에 따른 유의한 차이는 발견되지 않았다. 공기막 두께가 110, 175, 225 mm일 때 평균 관류전열량은 내부공기 주입의 경우 44.0, 51.2, 48.1 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 외부공기 주입의 경우 50.4, 46.6, 46.4 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 나타났으며, 이러한 차이는 챔버와 냉동실험실에 접해있는 공기막 공기의 온도차에 의한 자연대류 열전달의 영향인 것으로 판단된다. 그러나 자연대류에 의한 열전달은 미미한 수준으로, 이중필름 공기막은 주입공기의 온도변화에 관계없이 단열층의 역할을 하는 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 공기막 이중 PO필름의 단열성능 최적화를 위한 공기막 두께와 주입공기 온도에 대한 기초자료를 제공하기 위하여, 공기막 두께가 110, 175, 225 mm로 변화하는 경우와 공기막에 챔버 내부공기 또는 외부공기를 주입하는 경우에 대하여 단위면적 (m^2) 당 관류전열량의 변화를 비교·분석하였다. 그 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 공기막 두께에 따른 단위면적 (m^2) 당 관류전열량의 변화를 살펴보면 공기막에 챔버 내부공기를 주입한 경우 공기막 두께가 110 mm에서 175, 225 mm로 두꺼워짐에 따라 관류전열량은 평균 16.5 %, 9.4 % 증가하였고, 175 mm에서 225 mm로 두꺼워질 때에는 평균 6.1 % 감소하는 것으로 나타났다. 공기막에 외부공기를 주입할 경우 공기막 두께가 110 mm에서 175, 225 mm로 두꺼워짐에 따라 관류전열량은 평균 7.6 %, 8.0 % 감소하였고, 175 mm에서 225 mm로 두꺼워질 때에는 평균 0.4 % 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 공기막 두께 변화에 따른 관류전열량의 차이는 상대적으로 매우 작고, 뚜렷한 상관관계를 찾아보기 어려웠다.

2. 주입공기 온도에 따른 단위면적 (m^2) 당 관류전열량의 변화를 살펴보면 공기막에 챔버 내부공기 (0, 5, 10, 15 $^{\circ}C$) 또는 외부공기 ($-10^{\circ}C$) 주입에 따른 유의한 차이는 발견되지 않았다. 이는 두 피복층 사이의 공기층이 완전히 밀폐된 상태에서는 주입공기의 종류에 관계없이 공기막이 단열층의 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다.

본 논문은 2013년도 농촌진흥청 농업과학기술 공동연구개발사업 (과제번호: PJ007823)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Boodley, J. W., 1996. *The commercial greenhouse*. 2nd ed. Albany, New York: Delmar Publishers.
2. Fang, W., D. Mears, and A. J. Both, 2007. Story of air-inflated double-layer polyethylene greenhouse and its recent applications in Taiwan. *ASAE International Seminar on Agricultural Structures and Agricultural Engineering*. National Taiwan University, Taipei, Taiwan, R.O.C.
3. KRC, 1996. *Design standards for greenhouse environment (I)*. Korea Rural Community Corporation, Ansan (in korean).
4. Lee, H. W., H. S. Nam, S. Y. Sim, S. W. Nam, and Y. S. Kim, 2009a. Fundamental experiments for design of air inflating apparatus of air-inflated double-layer plastic greenhouse. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51 (5): 19-24 (in korean).
5. Lee, H. W., S. Y. Sim, H. S. Nam, S. W. Nam, and Y. S. Kim, 2009b. Development of design technology of korean style air-inflated double-layer plastic greenhouse. *Journal of Bio-Environment Control* 18(3): 185-191 (in Korean).
6. Lee, H. W., S. Y. Sim, and Y. S. Kim, 2010. Characteristics of PPF transmittance and heat flow by double covering methods of plastic film in tomato greenhouse. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(5): 11-18 (in korean).
7. Lee, K. M., J. Y. Oh, J. H. Kim, J. K. Song, K. H. Koo, and K. S. Park, 1999. *Environmental control and management automation*. Ilil Publishers (in korean).
8. Lee, S. Y., H. J. Kim, H. Chun, S. H. Yum, and H. J. Lee, 2007. Comparison of heat insulation characteristics of multi-layer thermal screen and development of curtain system. *Journal of Bio-Environment Control* 16(2): 89-95 (in korean).
9. Moon, J. P., N. K. Yun, S. H. Lee, H. J. Kim, S. J. Lee, and Y. H. Lee, 2010. Heat loss audit and assessment of the greenhouses using infrared thermal image analysis. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(2): 67-73 (in korean).
10. RDA, 2009. *Case collection of heat loss audit for agricultural facilities*. Rural Development Administration, Suwon (in korean).