

## 수막하우스의 유량 및 수온에 따른 열전달 특성 분석

김형권\* · 김승희 · 권진경  
국립원예특작과학원 시설원예연구소

### Analysis of Heat Transfer Characteristics in Response to Water Flow Rate and Temperature in Greenhouses with Water Curtain System

Hyung-Kweon Kim\*, Seoung-Hee Kim, and Jin-Kyeong Kwon

Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural and Herbal Science, RDA, Haman 52504, Korea

**Abstract.** This study analysed overall heat transfer coefficient, heat transmission, and rate of indoor air heating provided by water curtain in order to determine the heat transfer characteristic of double-layered greenhouse equipped with a water curtain system. The air temperatures between the inner and outer layers were determined by the water flow rate and inlet water temperature. Higher water flow rate and inlet water temperature resulted in the increased overall heat transfer coefficient between indoor greenhouse air and water curtain. However, it was found that with higher levels of water flow rate and inlet water temperature, indoor overall heat transfer coefficient was converged about  $10\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ . The low correlation of overall heat transfer coefficient between water curtain and air within double layers was likely because the combination of greenhouse shape, wind speed and outdoor air temperature as well as water curtain affected the heat transfer characteristics. As water flow rate and inlet water temperature increased, the heat transferred into the greenhouse by water curtain also tend to rise. However it was demonstrated that the rate of heat transmission from water curtain into greenhouse with water curtain system using underground water was accounted for 22% to 28% for total heat lost by water curtain. The results of this study which quantify heat transfer coefficient and net heat transfer from water curtain may be a good reference for economical design of water curtain system.

**Additional key words :** energy balance, heat insulating effect, heat transmission, heating effect, underground water

## 서 론

온실은 혹한기 거친 외부환경 변화에도 불구하고 안정적으로 다양한 작물을 생산할 수 있는 장점이 있다. 이를 위해 온실의 내부기온 등 미기상환경이 작물생육에 적합하도록 조절되어야하고 난방기를 이용한 가온의 필요성도 증가하고 있다. 그러나 온실에서 사용되는 골조와 피복재는 보온 및 단열에 매우 취약한 실정이다(Xu 등, 2014). 우리나라의 경우 온실의 난방면적이 전체 채소재배 온실면적의 30% 정도를 차지하는 등 난방의 필요성은 꾸준히 증가하고 있으며, 온실 난방비가 시설원에 경영비의 30~40%를 차지하고 있어 농가경영에 부담이 되고 있다(MAFRA, 2015; RDA, 2008, 2014). 이에 따라 온실의 보온력을 높이는 것이 난방비를 줄이기 위한 현실적인 대안으로 평가된다(Arinze 등, 1986; Zhang

등, 1996; Teitel 등 2009).

수막재배는 연중 일정한 수온을 유지하는 지하수를 비닐하우스 피복면에 살수하여 보온 내지는 약간의 가온 효과를 얻는 방식으로, 1980년대 초에 국내에 도입되었다(RDA, 2007, 2008). 한국의 수막온실은 2014년에 6,381ha에 이르고 있으며 대부분 단동 비닐하우스에서 사용되고 있다(MAFRA, 2015). 수막재배시스템은 수막에 의해 방출되는 열량의 대부분이 온실의 열손실을 억제하는데 사용되므로 난방수단이 아닌 보온수단으로 분류되고 있다(RDA, 2007, 2008). 이에 따라 지금까지 수막시스템 관련연구는 수막의 보온 및 작물재배효과에 대하여 주로 이루어져 왔다(Kim 등 2015; Lee 등, 2007; Park 등, 1988; Yun 등 1988). 그러나 수막에서 방출되는 열량의 일부는 온실의 가온에 이용되는 것으로 알려져 있으며, Walker (1979)와 Walker 등(1982)은 이러한 수막의 가온효과 구명을 위하여 수막 열전달방정식을 제안하였고, MAF (1998)의 연구에서는 선형 회귀식을 이용하여 수막유량에 따른 열전달계수를 산출하였다. 그러나 이러한 결과는 모형실험이나 이론적인 분석을 통해

\*Corresponding author: khgweon@korea.kr  
Received September 28, 2016; Revised November 9, 2016;  
Accepted November 11, 2016

주로 구해졌으며, 작물이 재배되는 실제 수막온실 환경에서 수막유량과 공급수온에 따른 수막시스템의 가온효과를 구명한 연구는 찾아보기 어려웠다.

본 연구에서는 수막온실의 열전달 특성 및 가온효과 구명을 위해 단동 이중비닐하우스에서 수막유량과 공급수온에 따른 온실 내·외부로 전달되는 열관류율과 관류열량의 변화를 비교분석하였다. 또한 수막에 의한 총 공급열량과 온실내부로 전달되는 열량의 비율 변화를 분석하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험온실과 환경계측

실험에 사용한 온실은 시설원에연구소(경남 함안군 소재)내에 위치한 단동 이중비닐하우스로, 폭 8m, 길이 40m, 지붕높이 3.6m이다. 온실은 남북동으로 1·2중 모두 0.1mm 두께의 PE필름으로 피복하였다. 실험은 딸기를 토경재배하는 조건에서 수행하였다. 실험에 사용한 수막시스템은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 수막으로 사용한 지하수를 가온장치(온수보일러)를 이용하여 재가열한 다음 다시 사용하는 순환식 수막시스템으로, 공급수온은 가온장치, 수막유량은 밸브를 이용하여 일단위로 조절하였다. 수막호스는 1중 하우스 내부 용마루에 설치하여 수막이 2중 하우스 양쪽 지붕에 고르게 살포되도록 하였다.

수막하우스의 기온효과 구명을 위한 실험은 2015년 12월 31일부터 2016년 3월 3일까지 수행하였다. 수막시스템은 오후 5시부터 익 일 오전 9시까지 가동되도록 하였고, 비교분석에 이용한 데이터는 일사의 영향을 최소화하기 위하여 오후 8시부터 익 일 오전 6시까지 측정된 데이터 값을 사용하였다. 또한 수막시스템을 실제 사용하는 농업인은 야간 최저기온이 영하인 경우에만 수막을 가동하는 것으로 보고되고 있다(Moon 등, 2012). 따라서 본 실험에서는 실험기간 중 야간 최저기온이 영

하로 떨어지고 데이터가 정상적으로 받아진 날의 데이터 값을 분석에 사용하였다.

수막온실의 열전달 특성을 분석하기 위하여 실내외 기온, 온실 1중(외부피복)과 2중(내부피복)사이의 기온, 공급수온과 배출수온을 각각 측정하였다. 실내외 기온은 온도센서 데이터로거(TempRetrieverRH, MadgeTech, Warner, NH, USA)를 실내에 3점, 실외에 2점 설치하여 측정하였다. 1중과 2중사이의 기온은 온도측정센서(80PK-1, Fluke, USA) 3점을 데이터로거(175T3, Testo, Germany)에 연결하여 저장하였다. 수막의 공급수온과 배출수온은 K형 열전대(thermocouple)를 각각 2점씩 설치하여 측정하였고, 데이터로거(MV 1000, Yokogawa, Japan)를 이용하여 기록하였다. 모든 측정 데이터는 10분 간격으로 저장하여 평균값을 사용하였다.

### 2. 수막시스템의 열전달 평형방정식

열은 전도, 대류, 복사 등의 형태로 전달되며, 온실에서의 열전달을 구명하기 위해서는 이러한 열 흐름을 종합적으로 고려하여야 한다. 온실의 열전달을 정상상태로 가정하면, 온실 벽체에서의 열전달은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다(Walker, 1979; Teitel 등 2009; Mills, 1992).

$$Q = UA(T_{IN} - T_{OUT}) \quad (1)$$

여기서,  $Q$ 는 관류열량(W),  $U$ 는 열관류율( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $A$ 는 온실의 피복면적( $m^2$ ),  $T_{IN}$ 은 온실 내부기온( $^\circ C$ ),  $T_{OUT}$ 은 온실 외부기온( $^\circ C$ )을 나타낸다.

식(1)을 이용하여 수막온실의 내피복면과 외피복면의 에너지 평형방정식을 구하면 다음 식(2)와 같다(Walker, 1979; Walker 등, 1982; MAF, 1998).

$$Q_W = U_{W-IN}(T_W - T_{IN}) + U_{W-B}(T_W - T_B) \quad (2)$$



(a) Water curtain system



(b) Greenhouse inside view

Fig. 1. Photographic view of experimental greenhouse.

여기서,  $Q_W$ 는 수막에 의한 단위면적당 총 공급열량 ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $U_{W-IN}$ 는 수막과 2중 하우스 내부와의 열관류율 ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $T_W((T_{W-IN}+T_{W-OUT})/2)$ 는 수막용수의 평균수온( $^\circ C$ ),  $U_{W-B}$ 는 수막과 1·2중 공기 사이의 열관류율 ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $T_B$ 는 1·2중 사이의 기온( $^\circ C$ )을 나타낸다.

수막온실에서 수막이 온실 내피복면을 타고 흐를 때 수막에 의해서 단위면적당 공급되는 총 열량은 다음 식(3)을 이용하여 구할 수 있다(Walker, 1979; MAF, 1998).

$$Q_W = mC_p(T_{W-IN} - T_{W-OUT}) \quad (3)$$

여기서,  $m$ 은 단위면적당 수막유량( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ),  $C_p$ 는 수막(물)의 정압비열( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $T_{W-IN}$ 은 공급되는 수막용수 수온( $^\circ C$ ),  $T_{W-OUT}$ 은 배출되는 수막용수 수온( $^\circ C$ )를 나타낸다.

식(2)와 (3)으로부터 다음 식(4)와 (5)를 구할 수 있다(Walker, 1979; Walker 등, 1982; MAF, 1998).

$$mC_p(T_{W-IN} - T_{W-OUT}) = U_{W-IN}(T_W - T_{IN}) + U_{W-B}(T_W - T_B) \quad (4)$$

$$mC_p(T_{W-IN} - T_{W-OUT}) / (T_W - T_B) = U_{W-IN}(T_W - T_{IN}) / (T_W - T_B) + U_{W-B} \quad (5)$$

식(5)에서  $mC_p(T_{W-IN} - T_{W-OUT}) / (T_W - T_B)$ 를  $Y$ 로 대체하고,  $(T_W - T_{IN}) / (T_W - T_B)$ 를  $X$ 로 대체하여 다음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

식(6)은 단순회귀식의 형태를 보이고 있으며,  $U_{W-IN}$ 은 기울기,  $U_{W-B}$ 는 절편을 의미한다(MAF, 1998).

$$Y = U_{W-IN}X + U_{W-B} \quad (6)$$

수막온실에서 이루어지는 열전달은 Fig. 2와 같은 단면도로 나타낼 수 있다. 수막에서 공급되는 총 열량( $Q_W$ )은 2중 하우스 내부로 전달되는 열량( $Q_{W-IN} = U_{W-IN}(T_W - T_{IN})$ )과 1중과 2중사이의 공간으로 방출되는 열량( $Q_{W-B} = U_{W-B}(T_W - T_B)$ )으로 구분되어진다.

## 결과 및 고찰

### 1. 실험조건에 따른 수막온실의 환경 분석

Table 1은 실험조건별 단위면적당 수막유량, 정압비열, 공급수온, 배출수온 등의 실험결과를 나타낸 것이다. 평균 외부기온이  $-3.5 \sim 0.8^\circ C$ 의 범위일 때, 수막재배농가에서 관행적으로 사용하는 수막유량과 공급수온을 고려하여(Lee 등, 2015; Moon 등, 2012; RDA, 2007, 2008) 수막유량은 수막이 흐르는 단위피복면적 당 평균  $0.00144 \sim 0.00271 L \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (온실 바닥면적당  $110 \sim 208 L \cdot 0.1ha^{-2} \cdot min^{-1}$ ), 공급수온은 평균  $12.8 \sim 19.8^\circ C$  범위로 유지하였다. 이때 온실 내부기온은  $8 \sim 10.3^\circ C$ 의 범위로 변화폭이 크지 않았고, 저온성 작물인 딸기의 야간 최저관리온도인  $5^\circ C$ (RDA, 2013) 보다는 모든 조건에서 높게 유지할 수 있었다. 공급수온과 배출수온의 차이는  $4.2 \sim 8.4^\circ C$ , 1중과 2중사이의 기온은  $1.3 \sim 2.9^\circ C$  범위로 분석되었다. 1중과 2중사이의 기온은 외부기온이 가장 높은 실험조건 A에서 가장 낮게 나타났고, 외부기온이 가장 낮은 F에서 가장 높게 나타났다. 이는 외부기온 보다는 수막유량과 공급수온이 1중과 2중사이의 기온에 영향을 미치기 때문으로 사료되며, 수막유량이 많을수록 공급수온이 높을수록 온실 내부기온이 높게 유지된다는 선행연구와 일치하는 결과이다(Kim 등, 2015; RDA, 2007, 2008). 수막의 정압비열은  $4192 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ 의 값을 사용하였다(Mills, 1992).

### 2. 수막유량 및 공급수온에 따른 $U_{W-IN}$ 과 $U_{W-B}$ 의 변화

Fig. 3은 수막유량이  $U_{W-IN}$ 과  $U_{W-B}$ 에 미치는 영향을 구명하기 위하여 수막유량에 따른  $U_{W-IN}$ 과  $U_{W-B}$ 의 변화를 나타낸 것이다. 공급수온이 평균  $13.5 \sim 14.7^\circ C$  범위로 비슷한 경우에 단위피복면적당 평균 수막유량이  $0.00144, 0.00224, 0.00269 L \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (온실 바닥면적당  $110, 172, 206 L \cdot 0.1ha^{-2} \cdot min^{-1}$ )로 변화할 때  $U_{W-IN}$ 은  $3.44, 4.64, 6.71 W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ 로 변화하였고,  $U_{W-B}$ 는  $3.27, 3.89, 4.21 W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ 로 변화하였다. 수막유량이  $0.00144$ 에서

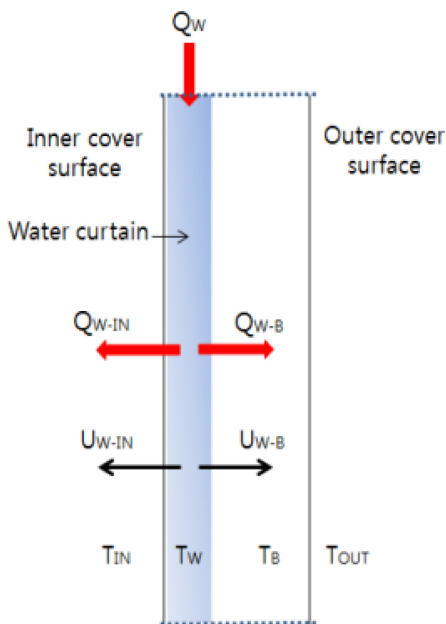
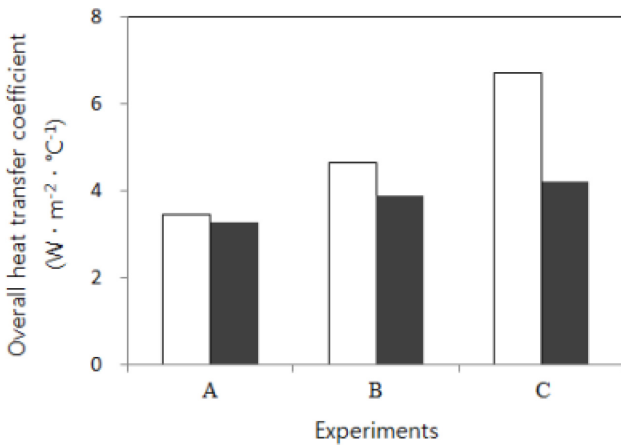


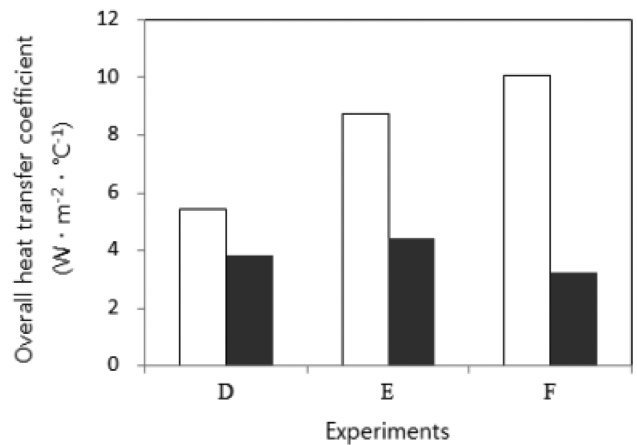
Fig. 2. Schematic diagram of energy balance of water curtain system.

**Table 1.** Water flow rate per unit area, specific heat and temperature for experiment.

Experiment	m (L·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	C <sub>p</sub> (J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	T <sub>W-IN</sub> (°C)	T <sub>W-OUT</sub> (°C)	T <sub>IN</sub> (°C)	T <sub>B</sub> (°C)	T <sub>OUT</sub> (°C)
A	0.00144	4192	13.5	7.3	8.0	1.3	-0.8
B	0.00224	4192	14.3	9.0	8.7	2.5	-1.4
C	0.00269	4192	14.7	9.4	9.3	2.4	-1.9
D	0.00261	4192	12.8	8.6	8.4	2.3	-1.6
E	0.00271	4192	16.3	10.1	10.3	2.7	-2.0
F	0.00266	4192	19.8	11.4	10.2	2.9	-3.5



**Fig. 3.** Comparison of overall heat transfer coefficients ( $U_{W-IN}$  (□) and  $U_{W-B}$  (■)) by heat transmission of water curtain. Water flow rate per unit area (L·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>): A 0.00144; B 0.00224; C 0.00269. Inlet water temperature (°C): A 13.5; B 14.3; C 14.7.



**Fig. 4.** Comparison of overall heat transfer coefficients ( $U_{W-IN}$  (□) and  $U_{W-B}$  (■)) by heat transmission of water curtain. Water flow rate per unit area (L·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>): D 0.00261; E 0.00271; F 0.00266. Inlet water temperature (°C): D 12.8; E 16.3; F 19.8.

0.00224L·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>로 0.0008L·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 증가함에 따라  $U_{W-IN}$ 와  $U_{W-B}$ 는 각각 1.2, 0.62W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup> 증가하였으며, 수막 유량이 0.00144에서 0.00269L·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>로 0.00125L·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 증가할 때는 각각 3.27, 0.95W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup> 증가하였다. 수막 유량이 증가함에 따라  $U_{W-IN}$ 은 증가하는 경향을 뚜렷하게 보였고, 증가폭도 급격하게 커지는 것을 확인할 수 있었다. 반면에  $U_{W-B}$ 는 증가폭이 상대적으로 작은 경향을 보였다.

Fig. 4는 공급수온이  $U_{W-IN}$ 과  $U_{W-B}$ 에 미치는 영향을 구명하기 위하여 공급수온에 따른  $U_{W-IN}$ 과  $U_{W-B}$ 의 변화를 나타낸 것이다. 수막유량이 평균 0.00261~0.00271L·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> (온실 바닥면적당 200~208L·0.1ha<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>) 범위로 비슷한 경우에  $U_{W-IN}$ 과  $U_{W-B}$ 는 공급수온이 평균 12.8°C일 때 각각 5.45, 3.28W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup>, 공급수온이 평균 16.3°C일 때 각각 8.73, 4.44W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup>, 공급수온이 평균 19.8°C일 때 각각 10.06, 3.26W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup>으로 나타났다. 공급수온이 12.8°C에서 16.3°C로 높아짐에 따라  $U_{W-IN}$ 은 3.28W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup>,  $U_{W-B}$ 는 0.62W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup> 증가하였으며, 공급수온이 12.8°C에서 19.8°C로 높아질 때는  $U_{W-IN}$ 은

4.61W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup> 증가하였고,  $U_{W-B}$ 는 오히려 0.56W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup> 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 보는바와 같이 수막유량이 증가할 수록, 공급수온이 높을수록 수막과 2중 하우스 내부와의 열관류율( $U_{W-IN}$ )은 유의하게 증가하는 것으로 나타났다. 수막유량이 증가하고 공급수온이 높아지면서 온실 피복면을 흐르는 수막에 더 많은 열량이 공급되고, 그로 인하여 주변으로의 열전달이 활발해지면서 비교적 많은 열이 온실내부로 전달되기 때문으로 판단된다. 반면에 수막과 1·2중 공기사이의 열관류율( $U_{W-B}$ ) 변화는 상대적으로 미미한 수준으로, 뚜렷한 상관관계를 찾아보기 어려웠다. 수막유량이 증가하고 공급수온이 높아지면서  $U_{W-IN}$ 의 증가율은 급격하게 커지고  $U_{W-B}$ 는 상대적으로 작다는 것은 온실 피복면에서의 열전달은 대류보다는 전도에 의해서 대부분 이루어지고(Kim 등, 2013), 수막에서의 증가된 열량은 수막과 2중피복면의 전도 열전달에 의해 지배되는 것으로 판단된다. Walk(1979)는 유리온실을 대상으로 수막유량이 0.01388~0.08333L·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 범위일 때  $U_{W-IN}$ 은 10.1W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup>,  $U_{W-B}$ 는 38.4W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>-1</sup>로 일정하

다고 보고하였고, Walk 등(1982)은 유리온실에서 수막유량이  $0.04L \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 이고 공급수온이  $3.3 \sim 17.3^{\circ}C$ 의 범위일 때  $U_{W-B}$ 는  $17.9 \sim 97.3W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$  범위로 보고하였다. MAF(1998)는 이중비닐하우스를 대상으로 수막유량이  $0.00257 \sim 0.00512L \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 일 때  $U_{W-IN}$ 은 약  $9.88W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$  수준으로 일정하고,  $U_{W-B}$ 는  $13.79 \sim 28.37W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$  범위에서 증가한다고 보고하였다.

본 연구 실험조건 F에서의 수막유량  $0.00266L \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 는 앞에서 언급한 기존연구와 비교하여 수막유량이 현저히 적음에도 불구하고, 공급수온이  $19.9^{\circ}C$ 인 조건에서  $U_{W-IN}$ 은  $10.06W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ 로 선행연구와 잘 일치하였다(MAF, 1998; Walk, 1979). 이처럼 수막유량과 공급수온이 증가함에 따라  $U_{W-IN}$  값이 커지다가 일정조건(수막유량  $0.00266L \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ , 공급수온  $19.9^{\circ}C$ ) 이상에서는 약  $10W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$  정도로 수렴한다는 사실을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 수막시스템이 난방장치라 아니라 보온장치라는 기존의 연구결과(RDA, 2007, 2008)를 설명하는 이론적 근거로 판단된다. 반면에  $U_{W-B}$ 는 연구자에 따라 큰 차이를 보이고 있으며, 동일 연구자에서도 실험조건에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 이러한  $U_{W-B}$  값의 차이는 기존의 연구들이 현저히 많은 수막유량 조건에서 이루어졌고 특히, Walk(1979), Walk 등(1982)은 수막이 외기와 직접 접하는 유리온실에서 실험한 결과로써 수막이 외기에 직접 노출됨으로써 외부로 손실되는 열량이 많아지고, 수막유량이 지나치게 증가함에 따라 유속이 빨라져 온실 내부로 충분한 전도열전달이 이루어지기 전에 외부로의 활발한 대류열전달에 의해 열손실이 많아지기 때문으로 판단된다(MAF, 1998). 이중비닐하우스에서 실험한 MAF(1998)의 경우도 과도한 수막유량과, 비닐 두께, 온실 형태, 크기, 방향 등이 전도열전달과 대류열전달의 변화에 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 그럼에도 공급수온과 수막유량이 증가함에 따라  $U_{W-B}$  값이 커지는 경향은 본 연구와 전체적으로 일치하였다. 본 연구는 농업인이 실제로 작물을 재배하는 수막온실과 가장 유사한 조건에서의 열관류율의 변화를 모의했다고 할 수 있으며, 본 연구의  $U_{W-B}$  값이 선행연구에 비해 상대적으로 적은

것으로 볼 때, 수막시스템의 효율적인 열용량 사용에 본 연구에서 사용한 수막온실의 형태가 가장 유리한 것으로 판단된다.

### 3. 수막의 열전달 및 가온효과 분석

Table 2는 수막온실의 실험조건에 따른 단위면적당 수막에 의한 총 공급열량과 온실 내·외부로의 관류열량의 변화를 계량화하여 나타낸 것이다. 수막유량과 공급수온의 증가에 따라 열량이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 수막 열용량이 증가함에 따른 물리적인 현상과 일치하는 결과이다. 수막에 의한 총 공급열량은 약  $37.6 \sim 93.5W \cdot m^{-2}$  범위로 분석되었고, 이중에서 2중 하우스 내부로 전달되는 열량은 약  $8.2 \sim 53.8W \cdot m^{-2}$ , 1중과 2중 하우스 사이로 손실되는 열량은 약  $29.7 \sim 46.4W \cdot m^{-2}$  범위로 나타났다. 본 연구에서 제시한 수막 자체의 총 열량과 관류열량이 정확성과 신뢰성을 가지기 위해서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이  $Q_W$  값이  $Q_{W-IN}$ 과  $Q_{W-B}$ 의 합과 이론적으로 일치하여야 한다. Table 2에서  $Q_W$  값이  $Q_{W-IN}$ 과  $Q_{W-B}$ 의 합과 매우 유사하게 일치하고 있어, 본 연구의 결과가 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다.

수막에 의한 총 공급열량에서 2중 하우스 내부공기를 가열하는데 사용되는 열량은 실험조건이 A, B, C, D, E, F로 변화할 때 각각 22, 28, 31, 27, 36, 57%로 나타났다. 이러한 결과는 수막에 의한 공급열량 중에서 내부공기를 가열하는데 사용되는 열량은 약 17~30% 정도라는 RDA(2007, 2008)의 보고와 실험조건 A, B, C, D, E에서는 잘 일치하였다. 반면에 실험조건 F의 가온효과는 공급열량의 57%로 매우 높게 나타났는데, 이는 수막유량과 공급수온이 RDA(2007, 2008)의 연구에 비해 지나치게 많음에 따른 차이로 판단된다. 이상의 결과를 종합해 볼 때 수막유량과 공급수온이 증가함에 따라 수막 열량에 의해 내부로 전달되는 열량비율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 일정수준이상의 수막유량과 공급수온에서  $U_{W-IN}$ 이 약  $10W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ 로 수렴되는 경향을 볼 때, 2중 하우스 내부로 전달되는 열량의 비율도 약 57% 수준이 최대인 것으로 추정이 가능하다. 우리나라

**Table 2.** Heat flux transferred into greenhouse and outside by water curtain.

Experiment	$Q_W$ ( $W \cdot m^{-2}$ )	$U_{W-IN}$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ )	$Q_{W-IN}$ ( $W \cdot m^{-2}$ )	$U_{W-B}$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ )	$Q_{W-B}$ ( $W \cdot m^{-2}$ )
A	37.6	3.44	8.2	3.27	29.7
B	50.0	4.64	13.9	3.89	35.9
C	59.8	6.71	18.5	4.21	40.8
D	45.5	5.45	12.5	3.82	32.3
E	71.2	8.73	25.5	4.44	46.4
F	93.5	10.06	53.8	3.26	41.2

라 지하수의 연평균 수온이 약 13.2~16.1°C이고, 지하수 고갈로 인해 실제 사용할 수 있는 수막유량의 감소를 고려할 때(Lee 등, 2015; Moon 등, 2012; RDA, 2007) A 또는 B가 농업인이 사용하는 수막온실조건과 가장 유사한 것으로 판단된다. 따라서 한국의 수막재배온실에서 가온에 사용되는 열량 비율은 약 22~28% 수준으로 보는 것이 타당하다.

## 결 론

단동 이중비닐하우스에서 수막에 의한 열전달 특성 및 가온효과를 구명하기 위하여 작물이 재배되는 수막온실의 실내외 기온과 수막의 수온 등을 측정하였고, 단위 피복면적당 수막에 의한 총 공급열량, 열관류율, 관류열량, 온실 내부로 전달되는 열량비율 변화를 비교분석하였다. 1중과 2중사이의 기온은 외부기온보다는 수막유량과 공급수온에 따라 결정되는 것으로 나타났다. 수막유량이 증가할수록, 공급수온이 높을수록 수막과 2중 하우스 내부와의 열관류율( $U_{W-IN}$ )은 유의하게 증가하는 경향을 보였다. 그러나 수막유량과 공급수온이 일정조건(수막유량  $0.00266L \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ , 공급수온 19.8°C) 이상에서는  $U_{W-IN}$  값이  $10W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$  정도로 수렴되는 것으로 나타났다. 수막과 1·2중 공기 사이의 열관류율( $U_{W-B}$ )의 경우에도 수막유량 및 공급수온에 따라 증가하는 경향을 보였으나, 경향성은 상대적으로 작은 것으로 분석되었다.  $U_{W-B}$ 는 연구자에 따라 전체적으로 큰 차이를 보이고 있으며, 본 연구에서는  $3.27 \sim 4.44W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ 의 범위를 보였다. 수막에 의한 총 공급열량( $Q_W$ )과 온실 내외부로 전달되는 관류열량( $Q_{W-IN}$ ,  $Q_{W-B}$ )의 경우,  $Q_W$  값이  $Q_{W-IN}$ 과  $Q_{W-B}$ 의 합과 매우 유사하게 일치하고 있어 본 연구에서 제시한 결과가 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다. 수막에 의해 내부공기를 가열하는데 사용되는 열량은 최대 57% 수준으로 분석되었고, 우리나라 수막재배온실의 경우 약 22~28% 수준으로 판단된다. 본 연구는 농업인이 실제 사용하는 수막온실과 가장 유사한 조건에서 수막에 의한 온도변화, 열관류율과 관류열량을 계량화함으로써 향후 경제적인 수막온실 설계 시 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**추가 주제어** : 가온효과, 관류열량, 보온효과, 열평형, 지하수

## 사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호:PJ01138601)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## Literature Cited

- Arinze, E.A., G.J. Schoenau, and R.W. Besant. 1986. Experimental and computer performance evaluation of a movable thermal insulation for energy conservation in greenhouses. *J. agric. Engng Res.* 34:97-113.
- Kim, H.K., J.G. Jeon, Y. Paek, S.H. Lee, N.K. Yun, and J.Y. Yoo. 2013. Analysis of Heat Transmission Characteristics through Air-Inflated Double Layer Film by Using Thermal Resistance Equation. *Protected Horticulture and Plant Factory* 22(4):316-321 (in Korean).
- Kim, H.K., J.G. Jeon, Y. Paek, H.Y. Pyo, J.W. Jeong, and Y.C. Kim. 2015. Analysis of temperature changes in greenhouse with recirculated water curtain system. *Protected Horticulture and Plant Factory* 24(2):93-99 (in Korean).
- Lee, B.J., Y.C. Kim, B.W. Cho, U. Yoon, K. Ha, and B.D. Lee, et al. 2015. Estimation of groundwater usage for water curtain cultivation using a rating curve. *The Journal of Engineering Geology* 25(1):35-43 (in Korean).
- Lee, J. H., S. Y. Lee, H. J. Kim, J. K. Kwon, N. J. Kang, J. W. Joung, H. C. Rhee, and Y. H. Chio. 2007. Efficient of the growth in strawberry using circular water curtain system. *Proceedings of Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 25(SUPPL. 1):72 (in Korean).
- Mills, A. F. 1992. Heat transfer. UCLA, Commonwealth Avenue, MA, USA.
- Ministry of Agriculture and Forestry (MAF). 1998. Optimum design of greenhouse structure for efficient environment control and energy saving. MAF, Gwacheon, Korea. p.167-195 (in Korean).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2015. Current status of greenhouses and products for vegetables in 2014. MAFRA, Sejong, Korea. p. 97-116 (in Korean).
- Moon, S. H., K. C. Ha, Y. C. Kim, and P. S. Yoon. 2012. Analysis of groundwater use and discharge in water curtain cultivation area: Case study of the cheongweon and chungju areas. *The Journal of Engineering Geology* 22(4):387-398 (in Korean).
- Park, J.C., C.K. Ahn, and K.Y. Han. 1988. Effects of water curtain system with ground water in film houses on heating and cooling air temperature. *J. Inst. Agr. Res. Util.* 22(1):107-121 (in Korean).
- Rural Development Administration (RDA). 2007. Development of the water curtain system in greenhouse. RDA, Suwon, Korea (in Korean).
- Rural Development Administration (RDA). 2008. Guidebook of energy saving for overcoming high oil price in protected horticulture. RDA, Suwon, Korea. p. 11, 60-68 (in Korean).
- Rural Development Administration (RDA). 2013. Strawberry. In: Guide for agricultural techniques. RDA, Suwon, Korea (in Korean).

- Rural Development Administration (RDA). 2014. Energy saving technology for protected horticulture. In: Guide for agricultural techniques. RDA, Suwon, Korea. p. 21 (in Korean).
- Teitel, M., M. Barak, and A. Antler. 2009. Effect of cyclic heating and a thermal screen on the nocturnal heat loss and microclimate of a greenhouse. *Biosystems Engineering* 102:162-170.
- Walker, P.N. 1979. Greenhouse surface heating with power plant cooling water: Heat transfer characteristics. *TRANSACTIONS of the ASABE*:1370-1374, 1390.
- Walker, P.N., J.N. Scarborough, and H.J. Rand. 1982. An experimental surface-heated greenhouse. *TRANSACTIONS of the ASABE*:1022-1025.
- Xu, J., Y. Li, R.Z. Wang, and W. Liu. 2014. Performance investigation of a solar heating system with underground seasonal energy storage for greenhouse application. *Energy* 67:63-73.
- Yun, C.J., M.J. Kim, J.S. Jung, and I.C. Yu. 1988. Effects of microclimate on the growth of lettuce and tomatoes in a water curtain. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 29(3):171-177 (in Korean).
- Zhang, Y., L. Gauthier, D.de. Halleux, B. Dansereau, and A. Gosselin. 1996. Effect of covering materials on energy consumption and greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology* 82(1-4):227-244.