

열저항식을 이용한 공기막 이중필름의 관류전열량 특성 분석

김형권^{1*} · 전종길¹ · 백이¹ · 이상호¹ · 윤남규² · 유주열³

¹국립원예특작과학원 시설원예시험장, ²국립농업과학원 재해예방공학과, ³화신농건

Analysis of Heat Transmission Characteristics through Air-Inflated Double Layer Film by Using Thermal Resistance Equation

Hyung-Kweon Kim^{1*}, Jong-Gil Jeon¹, Yee Paek¹, Sang-Ho Lee¹, Nam-Kyu Yun², and Ju-Yeol Yoo³

¹Protected Horticulture Research Station, NIHHS, RDA, Busan 618-800, Korea

²Agricultural Safety Engineering Division, NAAS, RDA, Suwon 441-707, Korea

³Wha Shin Agriconstruction Co, Guri 471-806, Korea

Abstract. This study was carried out to analyze heat transfer characteristics and heat flow through air-inflated double layer PO film with thermal resistance method. The experiments was conducted in the laboratory controlled air temperature between 258.0 K and 278.0 K. The experimental materials were made up two layers PO film and an inflated-air layer. The thickness of air-inflated layer was fixed at 3 types of 110, 175, 225 mm. The electrical circuit analogy for heat transfer by conduction, radiation and convection was introduced. Experimental data shows that the dominant thermal resistance in heat transfer through the air-inflated double layer film was convection. Calculation errors were 1.1~18.5 W for heat flow. In result, the method of thermal resistance could be introduced for analysis of heat flow characteristics through air-inflated double layer film.

Additional key words : air-inflated space thickness, injected air temperature, overall heat transfer, temperature variation, thermal circuit

서 론

온실의 난방부하(heating load)는 관류전열량, 틈새환기 전열량, 지중전열량 등의 합으로 계산되며, 이 중 피복체를 통한 관류전열량이 전체 난방부하의 60~100%로 대부분을 차지하고 있다(Korea Rural Community Corporation, 1996; Lee 등, 1999). 따라서 합리적인 난방부하 산정으로 에너지를 절감하기 위해서는 관류전열량에 대한 정확한 이해와 계산이 매우 중요하다. 최근 온실의 관류전열량 특성을 분석하기 위한 다양한 기초연구가 수행되고 있으나(Lee 등, 2010, 2011; Hwang 등, 2013), 공기막 이중필름을 대상으로 전도, 복사, 대류에 의한 관류전열량의 특성을 분석한 연구사례는 찾아보기 어려웠다. 실제 온실에서의 관류전열량 실험은 작물이 재배되는 조건에서 측정하는 장점이 있으나, 온실의 물리적 성질에 따라 실험방법이 불명확하고(Papadakis 등, 2000), 신뢰할 만한 특성 분석이 매우 어려운 실정이다. 따라서 관류전

열량을 분석하고 예측하기 위한 간단하면서도 신뢰할 수 있는 방법으로 열저항 개념을 도입할 필요가 있다. 열저항은 옴의 법칙(Ohm's law)에서 전기저항과 같은 개념으로, 열전달을 일종의 흐름으로 간주하여 열전달계수, 두께, 단면적 등의 조합에 의해 표현될 수 있다(Holman, 1992; Mills, 1992). 최근 열차폐코팅, 히트싱크 등의 경우 열저항식을 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Kim 등, 2002, 2013).

본 연구에서는 온실의 관류전열량을 분석하고 예측하는데 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 최근 에너지절감 측면에서 연구가 추진되고 있는 공기막 이중 PO필름에 대해 열저항식을 이용한 관류전열량의 계산값과 실험값을 비교·분석하고, 전도, 복사, 대류에 의한 열전달 특성을 규명하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료 및 챔버

본 실험에 사용된 재료는 Fig. 1과 같은 공기막 이중 PO필름으로써 가로×세로 각각 1m로 제작하였다. 공기막 두께는 110, 175, 225mm로 제작하였고 이음새 부분의

*Corresponding author: khgweon@korea.kr

Received September 16, 2013; Revised September 27, 2013;

Accepted October 10, 2013

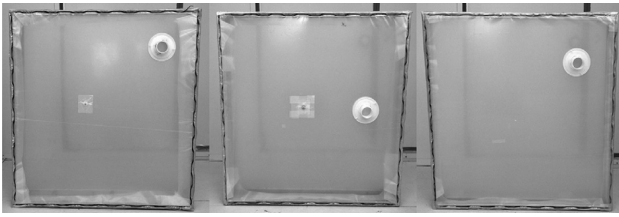


Fig. 1. Shapes of experimental material.

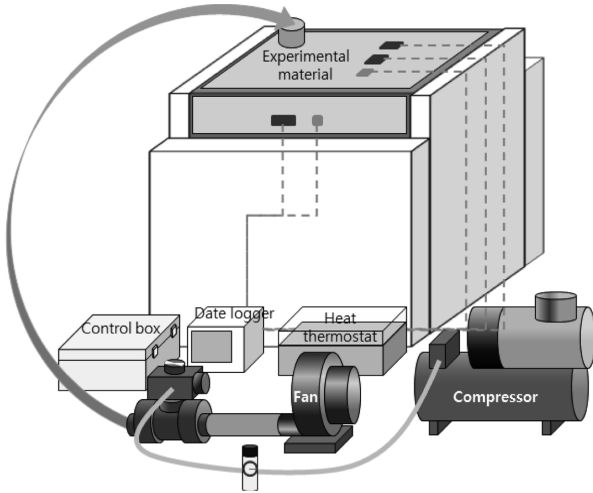


Fig. 2. Experimental chamber with an unit volume.

밀봉을 위해 실리콘과 테이핑으로 밀폐성을 높였다. 공기막 압력은 0.2mbar가 유지되도록 압력유지 및 역류방지 장치를 설치하였다.

실험은 시설원예시험장(부산시 강동동에 소재)내에 설치된 냉동실험실에서 2013년 7월 16일부터 8월 14일까지 수행하였다. 냉동실험실 내에 두께 100mm의 발포스티로폼 단열소재로 가로×세로×높이 각각 1m의 챔버를 설치하였으며, Fig. 2는 설치된 챔버를 보여주고 있다. 정육면체 중 유일하게 노출된 챔버 윗면에 공기막 이중 PO필름을 부착하여 실험할 수 있도록 구성하였다. 냉동실험실은 unit cooler를 설치하여 내부온도를 258.0~278.0K 범위에서 일정하게 유지할 수 있도록 구성하였고, 챔버는 전기온풍기를 설치하여 내부공기를 가열하고 온도를 제어할 수 있도록 하였다.

2. 실험조건 및 측정방법

Table 1은 공기막 두께, 챔버 내부온도, 공기막 주입공기 종류에 따른 실험조건을 나타낸 것이다. 공기막 두께는 110, 175, 225mm로 구분하였고, 냉동실험실 온도는 263.0K, 챔버 내부온도는 273.0K, 288.0K로 구분하였다. 공기막에 주입하는 공기의 종류는 챔버 내부공기(273.0K, 288.0K)를 주입하는 경우와 챔버 외부공기(263.0K)를 주입하는 경우로 구분하였다.

Table 1. Experimental condition.

Condition	Air inflated space thickness (mm)	Temperature of the chamber (K)	Kinds of injected air
A	110	273.0	
B	110	288.0	
C	175	273.0	Chamber inside
D	175	288.0	
E	225	273.0	
F	225	288.0	
G	110	273.0	
H	110	288.0	
I	175	273.0	Chamber outside
J	175	288.0	
K	225	273.0	
L	225	288.0	

목표가 되는 실험결과는 관류전열량으로써, 본 연구에서는 열저항식을 이용한 공기막 이중 PO필름의 관류전열량 검증용 데이터 획득을 위하여 챔버 바깥쪽(냉동실험실 방향) PO필름의 표면온도와 관류전열량, 챔버 안쪽 PO필름의 표면온도와 관류전열량을 측정하였다. 표면온도는 직경 0.3mm의 T형 열전쌍(thermocouple)을 이용하여 측정하였고, 관류전열량은 일본 EKO사의 열관류센서(MF-180M)를 이용하여 측정하였다. 측정된 데이터는 일본 Yokogawa사의 데이터로거(MV 1000)를 사용하여 30초 간격으로 저장하였고, 측정값의 평균값을 이용하였다.

3. 공기막 이중필름의 열저항식 모델링

이중 PO필름 사이의 공기막 공기유동은 자연대류유동으로 가정하였으며, 열전달은 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)를 고려하였다. 본 연구에 적용된 열저항식은 전기회로의 옴의 법칙(Ohm's law)과 유사한 개념으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다(Holman, 1992; Mills, 1992).

$$Q_{ov} = \frac{\Delta T}{R_{ov}} \tag{1}$$

여기서, Q_{ov} 는 총합열전달(W), ΔT 는 필름 양쪽의 온도차(K), R_{ov} 는 총합열저항($K \cdot W^{-1}$)을 나타내며, 총합열저항은 열전달의 형태에 따라 전도, 복사, 대류 열저항으로 구분할 수 있다.

전도 열저항식은 Fourier의 열전도법칙에서 식(2)와 같이 유도할 수 있다.

$$R_{cond} = \frac{\delta_{po}}{k_{po} \cdot A} \tag{2}$$

여기서, δ_{po} 는 재료의 두께(m), k_{po} 는 재료의 열전도계수

($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), A 는 재료의 단면적(m^2)을 나타낸다.

전자기복사에서 열이 온도차에 의해서만 전달될 때를 열복사라고 하는데, 이상적인 복사체는 Stefan-Boltzmann의 열복사법칙에 의해 식(3)과 같이 절대온도의 4제곱에 비례하는 에너지를 복사한다. 식(3)의 Stefan Boltzmann의 열복사법칙을 실제 복사체로 확장하고, 두 면의 온도 T_1 과 T_2 의 온도차가 크기 않을 경우 복사열전달은 식(4)와 같이 정의되며, 복사 열저항식은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{rad} = \sigma AT^4 \quad (3)$$

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma(4T_m^3)A(T_1 - T_2) = h_r A(T_1 - T_2) \quad (4)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{4\varepsilon\sigma AT_m^3} = \frac{1}{h_r A} \quad (5)$$

여기서, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수($5.67 \times 10W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$), A 는 단면적(m^2), T 는 절대온도(K), ε 은 방사율(emissivity), T_m 은 T_1 과 T_2 의 평균값, h_r 은 복사열전달계수($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)를 나타낸다.

대류에 의한 일반적인 열저항식은 Newton의 냉각법칙을 이용하여 식(6)과 같이 유도할 수 있으며, 대류열전달은 유체의 속도와 매우 밀접한 관계가 있다. 특히 자연대류에 의한 열전달은 Rayleigh 수의 범위에 따라 여러 가지 실험식을 적용할 수 있으며, Rayleigh 수가 작은 경우 공기막의 자연대류 효과도 작아지고, Rayleigh 수가 클 경우 자연대류 효과도 커지는 것을 알 수 있다. Rayleigh 수는 식(7)와 같이 Grashof 수와 Prandtl 수의 곱으로 나타내며, 본 실험에서와 같이 밀폐된 공간에서의 자연대류 겉보기열전도계수(apparent thermal conductivity) k_e 는 식(8)과 같은 실험식으로 표현된다. 따라서 공기막 이중필름의 자연대류 열저항식은 겉보기열전도계수 k_e 를 이용하여 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_c A} \quad (6)$$

$$Ra = GrPr = \frac{(\beta\Delta T)g\delta^3 Pr}{\nu^2} \quad (7)$$

$$\frac{k_e}{k_{air}} = C(GrPr)^n \left(\frac{L}{\delta}\right)^m \quad (8)$$

$$R_{conv} = \frac{\delta}{k_e A} \quad (9)$$

여기서, h_c 는 대류열전달계수($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), ν 는 동점성계수(kinematic viscosity), β 는 체적팽창계수(volume coefficient of expansion)로 1을 T_m 으로 나눈 값이 된다.

k_{air} 는 공기의 열전도계수, L 은 실험재료의 변의 길이를 나타내고, Holman(1992)의 자연대류 실험식에 따라 C 는 0.061, n 은 1/3, m 은 0을 적용하였다.

열저항 계산에서 적용된 재료의 물성치는 Table 2와 같으며, 열전도계수, 동점성계수, 방사율, Prandtl 수는 열전달에서 일반적으로 적용되는 값을 사용하였다(Mills, 1992; Mitchell, 1983).

Fig. 3은 본 실험에서 사용된 공기막 이중 PO필름의 단면도이다. PO필름, 공기막, PO필름이 각각 직렬로 연결되어 있으며, 상대적으로 온도가 높은 챔버쪽에 접해있는 PO필름(T_1)에서 상대적으로 온도가 낮은 냉동실험실쪽에 접해있는 PO필름(T_2)쪽으로 열전달이 이루어진다.

Fig. 4는 이러한 열전달의 과정을 열저항 회로도로서 나타낸 것이다. 열저항 회로도는 챔버쪽 PO필름은 전도, 공기막은 복사와 대류, 냉동실험실쪽 PO필름은 전도 열전달이 이루어지는 것으로 모델링하였다. 공기막은 병렬 회로 저항공식을 이용하여 식(10)과 같이 나타낼 수 있으며, 공기막 이중필름은 직렬회로 저항공식을 이용하여 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

Table 2. Physical properties of experimental materials.

Physical properties	Film	Air
Thermal conductivity ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	0.33	0.0267
Kinematic viscosity ($m^2 \cdot s^{-1}$)	-	15.66×10
Emissivity	0.90	-
Prandtl number	-	0.69

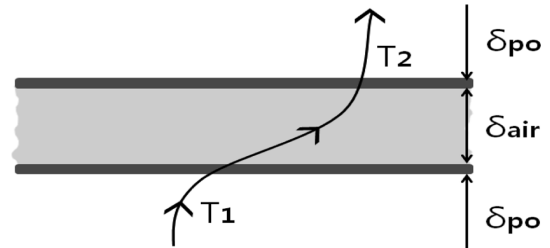


Fig. 3. The temperature variation across the composite wall.

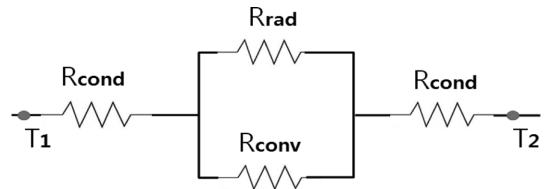


Fig. 4. The thermal circuit for heat transfer through air-inflated double layer film.

$$\frac{1}{R_{air}} = \frac{1}{R_{rad}} + \frac{1}{R_{conv}} \quad (10)$$

$$R_{ov} = R_{cond} + R_{air} + R_{cond}$$

$$= \frac{\delta_{po}}{k_{po}A} + \frac{1}{h_rA + h_cA} + \frac{\delta_{po}}{k_{po}A} \quad (11)$$

결과 및 고찰

1. 실험조건에 따른 온도변화

Fig. 5는 열저항식을 이용한 관류전열량 계산에서 가장 중요한 변수인 시뮬레이션별 온도변화 측정 결과를 나타낸 것이다. 고온부 T₁의 표면온도는 270.1~282.6K의 범위로 평균 276.1K였고, 저온부 T₂의 표면온도는 264.6~270.3K의 범위로 평균 266.8K였으며, T₁과 T₂는 약 9.3K의 차이를 보이고 있다.

공기막 두께에 따른 온도변화를 살펴보면, 공기막 두께가 110mm인 A, B, G, H의 T₁ 표면온도는 270.2~282.6K의 범위로 평균 276.3K였고, T₂ 표면온도는 264.7~270.3K의 범위로 평균 267.4K였다. 공기막 두께가 175mm인 C, D, I, J의 T₁이 270.3~282.4K의 범위로 평균 276.2K였고, T₂가 264.9~268.4K의 범위로 평균 266.6K였다. 공기막 두께가 225mm인 E, F, K, L의 T₁이 270.1~281.7K의 범위로 평균 275.8K였고, T₂가 264.6~267.9K의 범위로 평균 266.2K였다. 공기막 주입공기에 따른 온도변화는 챔버 내부공기를 주입한 A, B, C, D, E, F의 T₁이 270.1~282.6K의 범위로 평균 276.0K였고, T₂가 264.6~270.3K의 범위로 평균 266.9K였다. 챔버 외부공기를 주입한 G, H, I, J, K, L의 T₁이 270.2~282.4K의 범위로 평균 276.2K였고, T₂가 264.7~269.1K의 범위로 평균 266.6K였다. 공기막 두께에 따른 T₁ 평균온도는 0.5K, T₂ 평균온도는 1.2K, 공기막 주입공기에 따른 T₁ 평균온도는 0.2K, T₂ 평균온도는 0.3K 만큼 최대 변화하는 것으로 나타나, 공기막 두께와 주입공기의 종류에 따른 유의한 온도 변화는 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

챔버 온도에 따른 온도변화를 살펴보면, 챔버 온도가 273.0K인 A, C, E, G, I, K는 T₁이 270.1~270.7K의 범

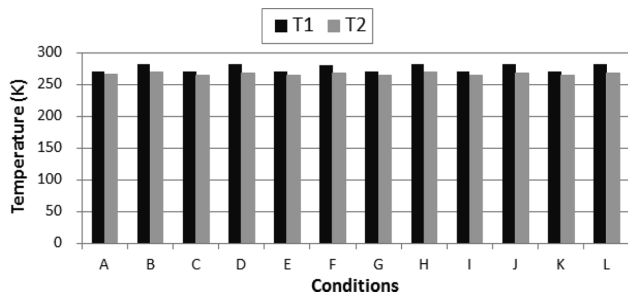


Fig. 5. The each surface temperature variation of a composite wall.

위로 평균 270.1K였고, T₂가 264.6~265.6K의 범위로 평균 264.9K였으며, 챔버 온도가 288.0K인 B, D, F, H, J, L은 T₁이 281.0~282.6K의 범위로 평균 281.9K였고, T₂가 267.8~270.3K의 범위로 평균 268.6K였다. 챔버 온도가 273.0K에서 288.0K로 증가함에 따라 T₁의 평균온도는 11.8K, T₂의 평균온도는 3.7K 만큼 증가하는 것으로 나타나, 챔버 온도가 증가할수록 T₁과 T₂의 평균온도와 온도차도 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

2. 열저항값의 비교

열저항값의 계산 결과, 전도열저항은 0.00091K·W⁻¹로 전체 열저항의 1% 미만으로 매우 미미한 수준이었다. 반면 대류, 복사 열저항은 각각 0.65, 0.25K·W⁻¹로 나타났다. 식(10)을 이용한 공기막 열저항은 0.18K·W⁻¹로 전체 열저항의 99% 이상을 차지하는 것으로 분석되었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 공기막 대류열저항은 0.55~0.78K·W⁻¹ 범위였고, 복사열저항은 0.23~0.26K·W⁻¹ 범위로 대류열저항이 복사열저항에 비해 1.33~2.08배 정도 큰 것으로 나타났다. 따라서 공기막 이중필름의 열저항은 대류에 의해 거의 완전히 지배되고 있음을 확인할 수 있었다.

실험조건에 따른 대류열저항의 변화를 살펴보면, 공기막 두께가 110, 175, 225mm로 증가함에 따라 각각 0.56~0.78, 0.55~0.75, 0.55~0.74K·W⁻¹ 범위로 평균값은 0.66, 0.65, 0.65K·W⁻¹였으며, 차이는 0.01K·W⁻¹로 매우 미세한 수준이었다. 이러한 결과에서도 공기막 두께와 보온효과는 뚜렷한 상관관계를 가지지 않는다는 것을 확인할 수 있었다(Lee 등, 2009). 공기막에 챔버 내부공기와 외부공기를 주입한 경우는 각각 0.56~0.78, 0.55~0.75K·W⁻¹ 범위로 평균값은 0.66, 0.65K·W⁻¹였으며, 차이는 0.01K·W⁻¹로 역시 매우 작게 나타났다. 챔버 온도 273.0, 288.0K에서는 각각 0.73~0.78, 0.55~0.57K·W⁻¹ 범위로 평균값은 0.75, 0.56K·W⁻¹였으며, 차이는 0.19K·

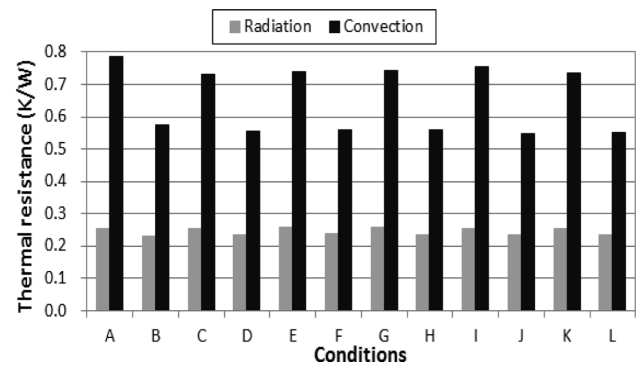


Fig. 6. Comparison of thermal resistance for radiation and convection.

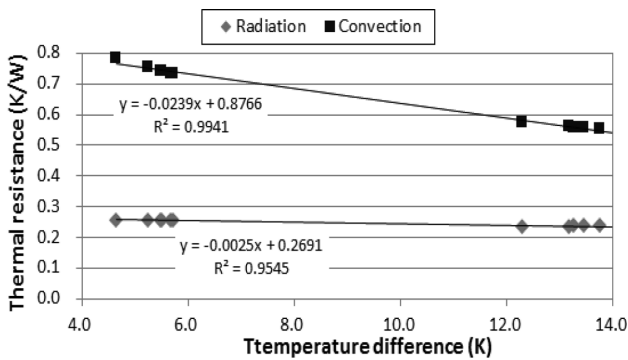


Fig. 7. Thermal resistance for temperature difference.

W⁻¹로 비교적 크게 나타났다.

복사열저항은 공기막 두께가 110, 175, 225mm로 증가함에 따라 각각 0.23~0.26, 0.23~0.26, 0.24~0.26K·W⁻¹ 범위로 평균값은 0.24, 0.25, 0.25K·W⁻¹였으며, 차이는 0.01K·W⁻¹로 매우 미세한 수준으로 나타났다. 공기막에 챔버 내부공기 또는 외부공기를 주입한 경우에는 범위와 평균값이 모두 0.23~0.26K·W⁻¹와 0.25K·W⁻¹로 동일하였다. 챔버 온도 273.0K에서는 범위와 평균값이 각각 0.25~0.26, 0.26K·W⁻¹, 288.0K에서는 범위와 평균값이 각각 0.23~0.24, 0.23K·W⁻¹로 나타나 챔버 온도가 낮은 273.0K가 챔버 온도가 높은 288.0K에 비해 복사 열저항값이 0.03K·W⁻¹ 정도 크게 나타났다.

이처럼 공기막의 두께, 주입공기의 종류, 챔버 내부온도에 따른 대류 열저항값의 차이는 각각 0.01, 0.01, 0.19K·W⁻¹, 복사 열저항값의 차이는 각각 0.01, 0, 0.03K·W⁻¹로 나타났다. 이는 공기막이 실질적으로 단열층의 역할을 하기 때문이며, 공기막 이중필름의 열저항은 공기막 두께 및 주입공기의 종류와는 직접적인 상관관계를 가지지 않음을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 T₁과 T₂의 온도차에 따른 복사열저항과 대류열저항의 변화를 나타낸 것이다. 복사열저항은 식(5)에서 T₁과 T₂의 평균온도의 3제곱에 반비례하는 것을 알 수 있는데, 복사열저항이 고온부와 저온부의 온도차가 클수록 미세하게 작아지는 것은 온도변화에서 살펴본 바와 같이 T₁과 T₂의 평균온도와 온도차가 서로 상관관계를 가지기 때문인 것으로 판단된다. 대류열저항은 온도차가 4.7, 5.3, 5.5, 5.7, 12.3, 13.2, 13.3, 13.5, 13.8 및 14.0K로 증가할 때 각각 0.78, 0.75, 0.74, 0.73, 0.57, 0.56, 0.56, 0.56, 0.55 및 0.55K·W⁻¹로 감소하는 뚜렷한 상관관계를 보이고 있으며, 결정계수는 0.99로 나타났다. 이러한 결과에서 복사열저항은 평균온도가 높을수록 감소하고, 대류열저항은 온도차가 클수록 감소하는 물리적인 법칙과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

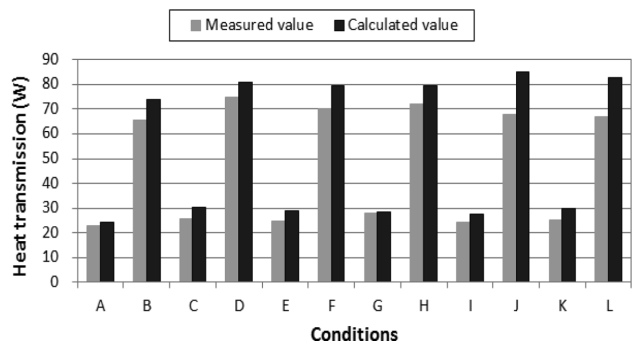


Fig. 8. Comparisons of heat flow quantity between measured and calculated.

3. 관류전열량의 계산값과 실험값 비교

열저항식의 타당성 검증을 위해 열저항식에 의한 계산값과 실험에 의한 실험값을 비교 검증하였다. Fig. 8에서 실험조건별 관류전열량 계산값과 실험값의 차이는 0.6~17.2W의 범위로 평균 6.9W였으며, 실험값은 계산값의 79.8~97.7% 범위로 평균 87.3% 수준으로 나타났다.

실험조건에 따른 관류전열량의 계산값과 실험값의 차이를 살펴보면 공기막 두께 110mm에서는 4.4W, 175mm에서는 7.7W, 225mm에서는 8.5W로 공기막 두께가 두꺼울수록 차이가 크게 나타났다. 이는 실제 열전달은 실험재료의 상·하면뿐만 아니라 측면을 통하여도 이루어지고 있는데, 실험값은 상·하면만을 실측하였고 계산값은 열이 상·하면만을 통하여 모두 전달되는 것으로 간주하였기 때문에 생긴 오차로 판단된다. 또한 실험값이 계산값에 비하여 일관되게 작게 나타나는 것도 이러한 원인인 것으로 판단된다. 공기막에 챔버 내부공기 또는 외부공기를 주입한 경우의 계산값과 실험값의 차이는 5.5W, 8.2W로 외부공기를 주입한 경우에 차이가 크게 나타났고, 챔버 온도가 273.0K, 288.0K일 때 계산값과 실험값의 차이는 3.1W, 10.6W로 챔버 온도가 높을수록 차이가 크게 나타났다. 이러한 차이는 열저항식의 계산에 사용된 계수값의 한계와 실제 비정상적인 자연대류 열유동을 수치화하여 분석한 것에 기인한 것으로 판단된다.

그럼에도 전체적인 계산값과 실험값의 관류전열량 경향성은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 잘 일치하고 있으며, 열전달량은 온도차가 크고 열저항값이 감소할수록 증가하는 식(1)의 물리법칙과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

적 요

본 연구는 온실의 관류전열량을 분석하고 예측하는데 필요한 기초자료 제공을 위하여, 공기막 이중 PO필름의 열저항식을 모델링하였고, 전도, 복사, 대류에 의한 열저항 특성을 규명하였다. 또한 열저항식의 타당성 검증을

위해 열저항식에 의한 관류전열량의 계산값과 실험값을 비교·분석하였다.

공기막 이중 PO필름의 열저항식은 PO필름, 공기막, PO필름의 직렬 열저항식으로 구성되며, 공기막은 복사와 대류에 의한 병렬 열저항식으로 구성된다. 고온부 T_1 의 평균온도는 276.1K, 저온부 T_2 의 평균온도는 266.8K로 나타났으며, 다른 조건들이 동일할 경우 챔버 내부온도가 높을수록 T_1 과 T_2 의 평균온도와 온도차가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 전도열저항은 $0.00091K \cdot W^{-1}$ 로 전체 열저항의 1% 미만으로 매우 미미한 수준이고, 공기막의 열저항이 $0.18K \cdot W^{-1}$ 로 전체 열저항의 99% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 공기막의 경우 대류열저항이 복사열저항에 비해 1.33~2.08배 정도 크게 나타났으며, 복사열저항은 평균온도의 3제곱에 반비례하고 대류열저항은 온도차가 4.7, 5.3, 5.5, 5.7, 12.3, 13.2, 13.3, 13.5, 13.8 및 14.0K로 증가할 때 각각 0.78, 0.75, 0.74, 0.73, 0.57, 0.56, 0.56, 0.56, 0.55 및 $0.55K \cdot W^{-1}$ 로 감소하였다. 관류전열량의 계산값과 실험값의 차이는 실험조건별로 0.6~17.2W의 범위로 평균 6.9W였으며, 실험값은 계산값의 79.8~97.7% 범위로 평균 87.3% 수준으로 나타났다. 전체적인 계산값과 실험값의 관류전열량 경향성은 잘 일치하고 있으며, 공기막 이중필름의 열저항은 공기막 두께 및 주입공기의 종류와는 직접적인 상관관계를 보이지 않았다.

추가 주제어 : 공기막 두께, 열회로, 온도변화, 주입공기 온도, 총합열전달

사 사

본 논문은 농촌진흥청 농업과학기술 공동연구개발사업(과제번호: PJ007823052013)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

Holman, J.P. 1992. Heat transfer. 7th ed. Mcgraw-Hill Pub-

lishing Co. p. 13-53, p. 350-356.
 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, J.H., J.H. Yun, O.K. Kwon, J.W. Kim, and C.S. Lee. 2002. An experimental study on the thermal resistance characteristics for various types of heat sinks. Proceeding of 2002 KSME spring conference:1418-1423 (in Korean).
 Kim, Y.S., J.M. Koo, and C.S. Seok. 2013. Thermal barrier performance evaluation using thermal resistance equation. Proceeding of 2013 KSME spring conference of materials and fracture:207-208 (in Korean).
 Korea Rural Community Corporation. 1996. Design standards for greenhouse environment (I). KRC, Ansan, Korea. p. 82-91 (in Korean).
 Lee, H.W., S.Y. Sim, H.S. Nam, S.W. Nam, and Y.S. Kim. 2009. Development of design technology of korea style air-inflated double-layer plastic greenhouse. Journal of Bio-Environment Control 18(3):185-191 (in Korean).
 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).
 Lee, H.W., S. Diop, and Y.S. Kim. 2011. Variation of the overall heat transfer coefficient of the plastic greenhouse covering material. Journal of Bio-Environment Control 20(2):72-77 (in Korean).
 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 Publishing Co. p. 98-101 (in Korean).
 Mills, A.F. 1992. Heat transfer. UCLA, Commonwealth Avenue, MA, USA. p. 7-37, p. 813-824.
 Mitchell, B.W. 1983. Instrumentation and measurement for environmental sciences. second ed. ASAE, St. Joseph, Michigan, USA. p. 9-17.
 Papadakis, G., D. Briassoulis, G.S. Mugnozza, G. Vox, P. Feuilleley, and J.A. Stoffers. 2000. Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. J. Agric. Engng. Res. 77(1):7-38.