

모바일 기반 온실 냉난방 부하 산정 프로그램 개발

문종필^{1*} · 방지웅² · 황정수¹ · 장재경¹ · 윤성욱¹

¹국립농업과학원 에너지환경공학과 연구사, ²국립원예특작과학원 시설원예연구소 연구사

Development of Greenhouse Cooling and Heating Load Calculation Program Based on Mobile

Jong Pil Moon^{1*}, Ji Woong Bang², Jeongsu Hwang¹, Jae Kyung Jang¹, Sung Wook Yun¹

¹Researcher, Department of Agricultural Engineering, NIAS, RDA, Jeonju 54875, Korea

²Researcher, Protected Horticulture Research Institute, NIHHS, RDA, Haman 52054, Korea

Abstract. In order to develop a mobile-based greenhouse energy calculation program, firstly, the overall thermal transmittance of 10 types of major covers and 16 types of insulation materials were measured. In addition, to estimate the overall thermal transmittance when the cover and insulation materials were installed in double or triple layers, 24 combinations of double installations and 59 combinations of triple installations were measured using the hotbox. Also, the overall thermal transmittance value for a single material and the thermal resistance value were used to calculate the overall thermal transmittance value at the time of multi-layer installation of covering and insulating materials, and the linear regression equation was derived to correct the error with the measured values. As a result of developing the model for estimating thermal transmittance when installing multiple layers of coverings and insulating materials based on the value of overall thermal transmittance of a single-material, the model evaluation index was 0.90 (good when it is 0.5 or more), indicating that the estimated value was very close to the actual value. In addition, as a result of the on-site test, it was evaluated that the estimated heat saving rate was smaller than the actual value with a relative error of 2%. Based on these results, a mobile-based greenhouse energy calculation program was developed that was implemented as an HTML5 standard web-based mobile web application and was designed to work with various mobile device and PC browsers with N-Screen support. It had functions to provides the overall thermal transmittance(heating load coefficient) for each combination of greenhouse coverings and thermal insulation materials and to evaluate the energy consumption during a specific period of the target greenhouse. It was estimated that an energy-saving greenhouse design would be possible with the optimal selection of coverings and insulation materials according to the region and shape of the greenhouse.

Additional key words : cooling and heating cost saving, digital agriculture, smart energy

서 론

국내 온실 면적은 2018년 현재 53,274ha이며 가온온실은 17,399ha로서 온실 전체면적의 32.7%를 차지하고 있다(MAFRA, 2019). 가온온실은 2005년에 12,733ha로서 24.5%를 차지하였고 2018년 현재에는 32.7%를 차지하고 있어 증가추세에 있다. 또한 시설원예농가의 생산비 중 난방비가 차지하는 비율은 30-40%(Lee 등, 2011)이다. 난방 연료중 유류의 비중이 2018년 현재 84%를 차지하고 있어 난방비는 시설재배농가의 큰 부담으로 작용하고 있다. 뿐만아니라 국내 온실의

90% 이상이 10년 이상 노후화된 시설로 보온성에 다양한 문제가 발생되고 있다. 이러한 상황을 극복하기 위해서는 시설 재배농가에서 주로 사용되고 있는 유류사용을 줄이고 열손실을 최소화하여 난방비용을 절감할 수 있는 에너지 절감기술 개발이 매우 중요하다. 온실의 열손실은 피복 및 보온재에 의한 관류(Hwang 등, 2013) 열손실이 60-100%를 차지하고 있으므로 이를 통한 열손실을 최소화해야 한다(Shin 등, 2016). 열손실 최소화를 위한 전제조건으로는 온실에 대한 열손실 평가가 명확하게 이루어져야 한다. 그리고 온실의 형태, 설치지역, 피복 및 보온재의 선택에 따른 열손실을 신속 편리하게 현장에서도 평가를 할 수 있어야 한다. 디지털 시대를 살고 있는 농민들에게는 스마트폰의 웹을 이용하여 온실에서 소요되는 냉난방 부하를 간단하고 편리하게 산정할 수 있다면

*Corresponding author: jpmoon2002@korea.kr

Received October 5, 2021; Revised October 24, 2021;

Accepted October 25, 2021

가장 합리적인 방법이라고 할 수 있다. 온실 에너지 계산 프로그램은 국립농업과학원에서 비주얼 베이직(VB) 언어로 작성한 PC기반 온실에너지계산 프로그램이 가장 먼저 개발되었고 국립원예특작과학원의 홈페이지에 게시된 온실 에너지 계산 프로그램(NIHHS, 2017)이 개발되었으나 농민들이 현장에서 사용하기에는 한계가 있어 잘 사용되지 않고 있는 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 다양한 피복 및 보온재의 종류와 설치 방법에 따른 열손실 평가 모델 개발, 주소검색에 의한 온실 위치 탐색, 70개 관측소의 표준기상 자료를 채용(PHIK, 2017)하는 등 농민, 농업관련 공무원, 관련업체 직원등이 온실에 대한 열손실 평가를 현장에서 직관적이면서 편리하게 수행할 수 있도록 모바일 기반의 온실에너지 계산 프로그램을 개발하였다.

재료 및 방법

1. 온실 주요 피복재 및 보온재 열관류율 측정

1.1 열관류율 측정방법

플라스틱온실에서 가장 보편적이며 많이 사용되고 피복재

10종, 보온재 16종, 피복 및 보온재의 이중 설치시 24조합, 삼중 설치시 59 조합을 내외부 온도차(외기온-10°C, 온실내부 온도20°C)가 30°C사이가 될 때의 열관류율을 열상지(Hotbox)에 의하여 측정하였다(Yun 등, 2019). 시험방법은 열박스의 온도가 50°C에 도달되면 히터(1kW)가 정지하도록 하고 열박스의 내부열이 실험재료를 통하여 외부로 방열되는 구조로 Fig. 1과 같이 제작하여 실험하였으며 이때의 열박스의 내외부 온도차를 PT-100 온도센서(Pt100-Kabelfühler, Ahlborn, Germany)로 측정하였으며 열관류율 센서(Wärmeflussplatte, Ahlborn, Germany)를 실험재료에 부착하여 측정하였고 데이터로거(Almemo 5690-2, Ahlborn, Germany)에 저장하였다. 피복 및 보온재의 이중, 삼중 실험시 재료의 간격은 20cm를 유지하였으며 시험자료 수집과정은 아래 Fig. 2와 같다.

1.2 주요 피복재의 열절감율, 난방부하계수 산정

재료별 측정된 열관류율값의 단위가 $W \cdot m^{-2}$ 이므로 온도차가 30°C인 점을 고려하여 열관류율 측정값을 30°C로 나누어 단위가 $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ 인 난방부하계수로 환산을 하였다. 열절감

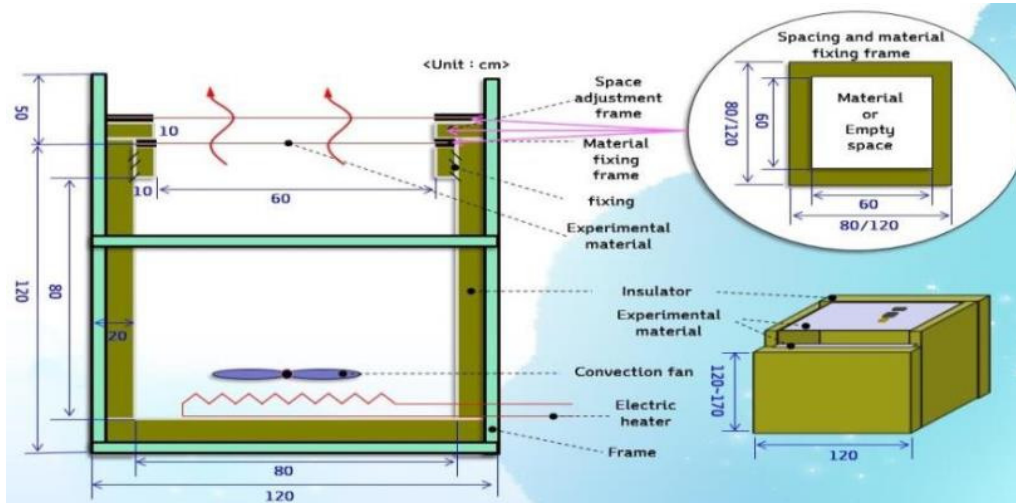


Fig. 1. A design drawing for hotbox which can measure the overall heat transmission coefficient.

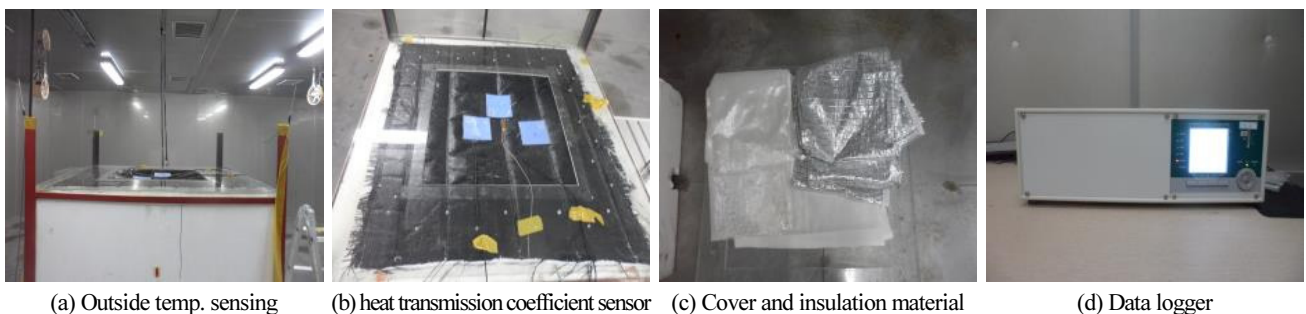


Fig. 2. Overall heat transmission coefficient measuring processes ((a), (b), (c), (d)).

율은 난방부하계수 산정방식에 의해 산정된 재료별 난방부하계수를 이용하여 단일 피복재 열절감율을 아래와 같은 방법으로 산정하였으며 PE 필름(0.08mm)에 대한 난방부하계수 $6.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 를 기준으로 하여 PE 필름(0.08mm) 대비 상대적인 열절감율을 식 (1)에 의하여 산정하였다.

$$R_{hs} = \frac{(6.6 - H_{coef})}{6.6} \times 100 \quad (1)$$

여기서 R_{hs} : 열절감율(%),

H_{coef} : 난방부하계수($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$)

6.6 : PE 필름(0.08mm)의
난방부하계수($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$)

1.3 주요 보온재의 구성재료, 난방부하계수, 열절감율 산정
단일보온재의 난방부하계수 및 열절감율 산정은 단일 피복재의 난방부하계수 및 열절감율 산정방식과 동일한 방식으로 산정하였으며 보온재 역시 PE 필름(0.08mm)에 대한 난방부하계수 $6.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 를 기준으로 하여 PE 필름(0.08mm) 대비 상대적인 열절감율로 산정하였다. 대표 보온재의 구성 재료는 아래와 같으며 주로 농가 현장에서 많이 사용되고 있는 보온재 5종류를 시험재료로 결정하여 열관류율을 측정하였다.

- ① 다겹보온커튼(3겹) : 미니마트지 + 편칭 화학솜 100g + 미니마트지
- ② 알루미늄 다겹보온커튼(4겹) : 알루미늄스크린 95% + 부직포 40g + 화학솜 4온스 + 미니마트지
- ③ 다겹보온커튼(4겹) : 미니마트지 + 부직포 40g + 화학솜 4온스 + 미니마트지
- ④ 고기능 다겹보온커튼(5겹) : 미니마트지 + 방발수코팅 부직포80g + 중공사솜80g + 방발수코팅부직포80g + 미니마트지
- ⑤ 다겹보온커튼(5겹) : 미니마트지 + PE폼 + 화학솜4온스 + 부직포40g + 미니마트지

1.4 이중, 삼중 설치시 조합별 열관류율, 난방부하계수, 열절감율 산정

주요 피복 및 보온재의 이중 설치시 조합별 24가지 경우를 측정하였으며 삼중 설치시 조합별 59가지 경우를 측정하였다. 측정된 결과를 주요 피복 및 보온재의 다중설치시 열관류율 산정 및 보정식 도출에 실측자료로 사용하였다.

2. 온실 냉난방 부하 산정 프로그램 개발

2.1 피복 및 보온재의 다중 설치시 조합별 열관류율 추정 모델 개발

1) 단일재료 열관류율 값을 이용하여 열저항식에 의한 전체적인 열관류율 산정

피복 및 보온재가 다중으로 설치되었을 경우 단일재료에 대한 측정된 열관류율 값의 역수를 취하여 식 (2)와 같이 더하면 전체 열저항값이 산정이 되고 식 (3)과 같이 전체 열저항값의 역수를 취하여 다중 설치된 피복 및 보온재의 총 열관류율을 산정하였다.

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3} \dots \frac{1}{t_n}} \quad (2)$$

$$T_t = \frac{1}{R_t} \quad (3)$$

여기서 R_t : 전체 열저항값($\text{m}^2\cdot\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$),

t_1 : 1중 피복재 열관류율($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$)

t_2 : 2중 피복재 열관류율($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$)

t_3 : 3중 피복재 열관류율($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$)

t_n : n중 피복재 열관류율($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$)

T_t : 다중 피복의 열관류율($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$)

2) 온실 실증실험에 의한 열절감율 검증 및 열관류율 추정 모형 검증

열절감율을 실증하기 위해 시험온실을 Figs. 3, 4, 5, 6와 같이 단동과 2연동온실에 대해 조성하였으며 시험조건을 Table 1과 같은 조건으로 시험하였다. 대조구 온실은 PE 필름온실로 지정하였으며 외피인 PE 필름(0.15mm) 만을 남기고 내피인 PE 필름(0.10mm)과 보온커튼은 모두 열어 외피만이 피복되어 있도록 유지하였다. Table 1의 시험온실 피복 및 보온조건 별 단기간(2일) 동안의 연료소비량을 측정하여 비교시험을 실시하였다.

2.2 모바일 기반 온실 에너지 계산 프로그램 개발

모바일 기반의 온실 에너지 계산 프로그램을 개발하기 위하여 지역 및 온실 형태를 반영할 수 있도록 웹주소 검색엔진 도입, 온실 표면적 계산 기능을 개발하였다. 또한 설계외기온, 표준기상자료에 대한 데이터베이스를 구축하였고, 이를 기반으로 하여 온실 위치, 형태, 피복·보온재의 특성을 반영하여 온실 냉난방 부하를 산정할 수 있는 모바일 기반의 웹 프로그램을

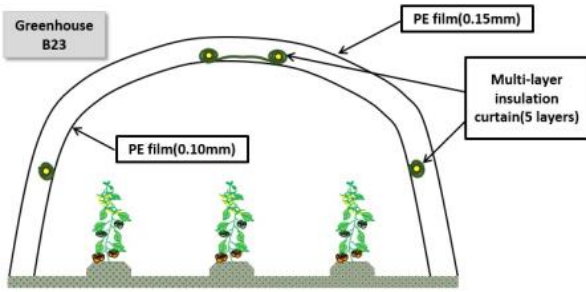


Fig. 3. A cover and an insulation curtain in PE film(B23).

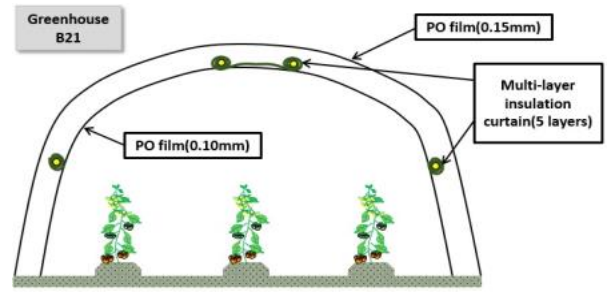


Fig. 4. A cover and an insulation curtain in PO film(B21).

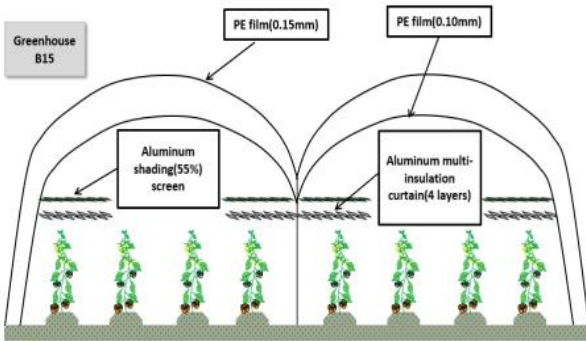


Fig. 5. A cover and an insulation curtain in PE film(B15).

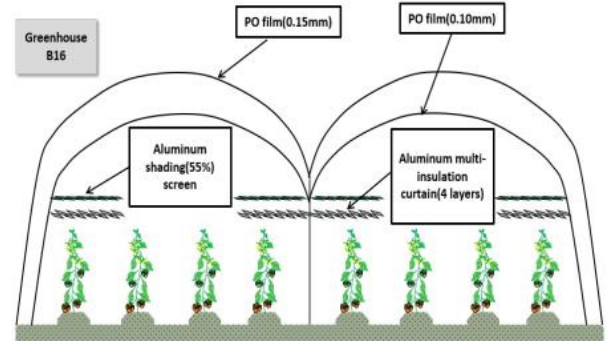


Fig. 6. A cover and an insulation curtain in PO film(B16).

개발하였다. 프로그램의 개발환경은 HTML5(W3C, 2010) 표준 웹 기반 모바일 웹 애플리케이션으로 구현되었다. 뿐만 아니라 N-Screen 지원을 통해 다양한 모바일 장치 및 PC 브라우저에서 동작이 가능하며 HTML5 웹 표준을 지원하는 구글 크롬(Chrome) 및 마이크로소프트 엣지(Edge) 브라우저 등에 최적화되어 있다. 또한 온실 에너지 계산프로그램에 반영된 최대난방부하, 주간냉방, 야간냉방, 기간난방부하 메뉴 산정을 위한 계산식은 식 (4) - 식 (10)과 같다.

1) 최대난방부하

전체 난방부하는 농진청에서 발행된 열손실 진단사례집 (RDA, 2009)을 참고하여 관류열부하의 1.2배로 계산하여 식 (4)와 같이 간편식으로 산정하였다.

$$Q_{\max} = A_w \times K_w \times (T_o - T_i) \times 1.2 \quad (4)$$

여기서 Q_{\max} : 최대난방부하(W)

A_w : 온실표면적(m^2)

K_w : 난방부하계수($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$) = 피복 및 보온재의 전체 열관류율

T_o : 위험을별 최저설계외기온($^\circ C$) = (RDA, 2009)

T_i : 야간의 실내설정온도($^\circ C$), 1.2[충부하는 관류 열 부하의 1.2배](RDA, 2009)]

2) 난방기 용량

식 (4)에서 산정된 최대난방부하를 기준으로 난방기 용량 (Kim, 2000)을 식 (5)과 같이 산정하였다.

$$H_c = Q_{\max} (1 + \gamma) \quad (5)$$

여기서 H_c : 난방기 용량(W), γ : 안전계수(0.1)

3) 주간냉방부하

주간냉방부하는 국립농업과학원에서 발간한 에너지절감 가이드북(NIAS, 2010)에서 제시된 주간냉방부하식을 인용하였으며 식 (6)과 같다.

$$Q_d = A_g \times [(K_w \times \frac{A_w}{A_g} + 3.1) \times (T_o - T_i) + R_s \times (1 - \eta) - 44.8] \quad (6)$$

여기서 Q_d : 주간냉방부하(W), A_g : 온실바닥면적(m^2)

η : 차광율(%), K_w : 열관류율($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)
 A_w : 온실표면적(m^2)
 T_o : 주간외기온($^\circ C$) = (한국패시브건축협회 제공 70개소 표준기상자료이용)
 T_i : 주간실내설정온도($^\circ C$)
 R_s : 단위면적당 1시간 동안의 최대 일사량($kcal/m^2 \cdot hr$) (한국패시브건축협회 제공 70개소 표준기상자료 이용)

T_i : 야간의 실내설정온도($^\circ C$)

4) 야간냉방부하

야간냉방부하도 역시 국립농업과학원에서 발간한 에너지 절감가이드북(NIAS, 2010)에서 제시된 야간냉방부하식을 인용하였으며 식(7)과 같다.

$$Q_n = A_g \times [(K_w \times \frac{A_w}{A_g} + 3.1) \times (T_o - T_i) - 44.8] \quad (7)$$

여기서 Q_n : 야간냉방부하(W), A_g : 온실바닥면적(m^2)
 K_w : 열관류율($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$), A_w : 온실표면적(m^2)
 T_o : 주간외기온($^\circ C$) = (한국패시브건축협회 제공 70개소 표준기상자료 이용)

5) 히트펌프 용량 결정

최근에는 히트펌프에 대한 사용량이 증가하여 히트펌프의 용량 산정에 대한 식(8)을 농업시설공학(Kim 등, 2000)에서 인용하였다.

$$W_{hp} = (\frac{Q_{hc}}{COP \times 860}) \times (1 + \gamma) \quad (8)$$

여기서 Q_{hc} : 주간냉난방부하(W), COP : 히트펌프 성능계수
 W_{hp} : 히트펌프 용량(kW), γ : 안전계수(0.1)

6) 기간난방부하

기간난방부하는 식(9)와 같이 산정하였으며 시간별 난방부하는 식(4)에 의한 간편식으로 산정하였다. 또한 주간에 일사량이 온실내부로 투입되어질 때는 난방을 하지 않으므로 평균적인 일조시간에 따른 조정계수 0.75 곱하여 산정하였다(RDA, 2015).

$$Q_{hd} = S_c \times A_w \times K_w \times DH \times 1.2 \quad (9)$$

Table 1. Model estimated heat saving rates when installing multi-layers of cover and insulation materials.

Num.	Item	Cover and Insulation materials				Estimated Heating load Coefficient ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)	Estimated heat saving rate (%)
		First layer (thickness (mm))	Second layer (thickness (mm))	Third layer	Fourth layer		
1	(Single span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	Multi-layer (5 layers) insulation curtain	-	1.2	79 (Compared with PE film 0.15mm) = (5.6-1.2)/5.6×100
2	(Single span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	-	-	2.9	48 (Compared with PE film 0.15mm) = (5.6-2.9)/5.6×100
3	(Double span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	Aluminium (4 layers) insulation curtain	-	1.2	79 (Compared with PE film 0.15mm) = (5.6-1.2)/5.6×100
4	(Double span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	-	-	2.9	48 (Compared with PE film 0.15mm) = (5.6-2.9)/5.6×100
5	(Double span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	-	-	2.9	48 (Compared with PE film 0.15mm) = (5.6-2.9)/5.6×100
6	(Double span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	Aluminium (4 layers) insulation curtain	Aluminium screen (shading rate : :55%)	0.8	85 (Compared with PE film 0.15mm) = (5.6-0.8)/5.6×100

여기서 Q_{hd} : 기간난방부하(W·h),
 S_c : 일조시간에 따른 조정계수(0.75)
 A_w : 온실표면적(m²)
 K_w : 열관류율(W·m⁻²·°C⁻¹)
 DH : 난방디그리아워(°C·h),
 $DH = \sum_{i=1}^n [\int_{t_1}^{t_2} (T_i - T_o)]_i$, 단 $T_i < T_o$ 이면 $T_i - T_o = 0$

여기서 T_i : 실내 설정온도(°C)
 T_o : 표준기상자료 외기온,
 t : hour, i : day (T_o 는 한국패시브건축협회에서 제공된 기상관측소 70개소의 시간별표준기상자료임(분석기간: 2006 - 2015))

7) 연료소비량 추정

연료소비량은 식(9)에서 구한 기간난방부하량을 단위부피 및 단위중량당의 연료의 총발열량과 난방기효율으로 나누어 기간별 연료소비량을 식(10)과 같이 산정하였다(Kim 등, 2000).

$$F_s = \frac{Q_h}{\beta \cdot \eta} \tag{10}$$

여기서 F_s : 연료소비량(l, kg, etc), Q_h : 기간난방부하(W·h)
 β : 연료의 총발열량(W·h·l⁻¹, W·h·kg⁻¹, etc),
 η : 난방기 효율(온풍난방기 0.85, 온수보일러 0.8 적용)

결과 및 고찰

1. 주요 피복재 및 보온재의 열관류율 측정 결과

1.1 단일 피복재의 열관류율 측정에 의한 열절감율 및 난방부하계수 산정 결과

단일 피복재의 재질별 규격별 PO, PE, EVA, 불소 필름에 대한 측정결과는 Table 2와 같으며 측정된 열관류율을 이용하여 단일 피복재의 열절감율 및 난방부하계수를 산정한 결과 PO필름(0.15mm)이 가장 열관류율이 가장 작고 PE필름(0.08mm)대비 열절감율이 가장 큰 것으로 나타났다.

1.2 단일 보온재의 열관류율 측정에 의한 열절감율 및 난방부하계수 산정 결과

단일 보온재의 재질별 규격별 측정결과는 Table 3과 같으며 측정된 열관류율을 이용하여 단일 보온재의 열절감율 및 난방부하계수를 산정한 결과 외피가 있는 5겹의 다겹보온커튼, 4겹 알루미늄 다겹보온커튼, 5겹의 다겹보온커튼의 순으로 보온력이 좋은 것으로 나타났다.

2. 온실 냉난방부하 산정 및 피복·보온재의 보온성 평가 모델 제시

2.1 온실 다중 피복 및 보온재 조합별 열절감율 예측 모델 개발

피복 및 보온재의 단일재료에 대한 측정된 열관류율값을 이용하여 피복 및 보온재의 조합별 열관류율 보정식을 개발하였

Table 2. Overall thermal transmittance, heating load coefficient, heat saving rate calculation for major single covering material.

Item	Cover material (thickness (mm))	Overall thermal transmittance (W·m ⁻²)	Heating load coefficient (W·m ⁻² ·°C ⁻¹)	Heat saving rate (%) (Compared with PE film (0.08 mm))
1	PE film (0.08)	198	6.6	0.0
2	PE film (0.10)	186	6.2	7.0
3	PE film (0.15)	168	5.6	15.8
4	PO film (0.08)	180	6.0	8.8
5	PO film (0.10)	156	5.2	21.1
6	PO film (0.15)	153	5.1	22.8
7	EVA film (0.10)	186	6.2	7.0
8	EVA film (0.08)	192	6.4	3.5
9	EVA film (0.05)	198	6.6	0.0
10	Fluoride film (0.10)	198	6.6	0.0
11	PVC film	198*	6.6*	0.0
12	Glass	186*	6.2*	7.0

* Reference adoption data (RDA, 2015)

Table 3. Overall thermal transmittance, heating load coefficient, heat saving rate calculation for major single insulation material.

Item	Insulation material	Overall thermal transmittance ($W \cdot m^{-2}$)	Heating load coefficient ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)	Heat saving rate (%) (Compared with PE film (0.08 mm))
1	Non-woven fabric 80 g	171	5.7	13.6
2	Woven film (0.15 mm)	180	6.0	9.2
3	Oxford 300 textile	168	5.6	15.6
4	Oxford 600 textile	171	5.7	13.8
5	ALuminum (AL) screen (shading rate 10%)	177	5.9	10.4
6	ALuminum (AL) screen (shading rate 55%)	165	5.5	16.7
7	ALuminum (AL) screen (shading rate 75%)	162	5.4	18.1
8	ALuminum (AL) screen (shading rate 85%)	162	5.4	18.8
9	ALuminum (AL) screen (shading rate 95%)	156	5.2	21.3
10	ALuminum (AL) screen (shading rate 100%)	144	4.8	27.0
11	Multi-layer thermal curtain (3 layers)	135	4.5	32.3
12	Multi-layer thermal curtain (4 layers)	93	3.1	53.7
13	Multi-layer thermal curtain (5 layers)	81	2.7	59.6
14	Multi-layer thermal curtain (external PE cover + 5 layers)	60	2.0	70.2
15	Multi-layer thermal curtain (AL screen + 3 layers)	72	2.4	63.2
16	Multi-layer thermal curtain with High-function (waterproof-water repellent coating fabric + 3layers)	96	3.2	51.7

으며 단일재료 열관류율 값을 이용하여 열저항식에 의한 전체적인 열관류율 산정하는 방법은 식(2), (3)에서 이미 언급하였다.

식(2), (3)에 의해 다중 피복의 총열관류율을 산정하여 계산된 총열관류율값과 선형회귀분석을 Fig. 7과 같이 실시하고 식(11)과 같은 보정식을 도출하였다.

$$Y_t = 1.2944 T_t - 0.4205 \quad (11)$$

여기서 Y_t : 보정된 총열관류율값

T_t : 계산된 총열관류율값

총열저항 계산식(2)와 총열관류율 계산식(3)에 의하여 산정된 총열관류율을 식(11)에 의하여 보정하였으면 보정된 값과 실측값을 1:1 등가선도에 도시한 결과 Fig. 8과 같았다. 보정된 결과는 Nash & sutcliff coefficient 방법에 의해 모형평가지수를 산정한 결과 0.90(0.5이상일 때 양호)으로 나타나 보정치가 실측치를 매우 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다.

2.2 온실 실증실험에 의한 열절감율 검증 및 열관류율 추정 모델 평가

열절감율을 실증하기 위하여 대조구 온실은 PE 필름(0.15mm) 일중 피복온실로 하여 피복 및 보온조건별 단기간(2일) 동안

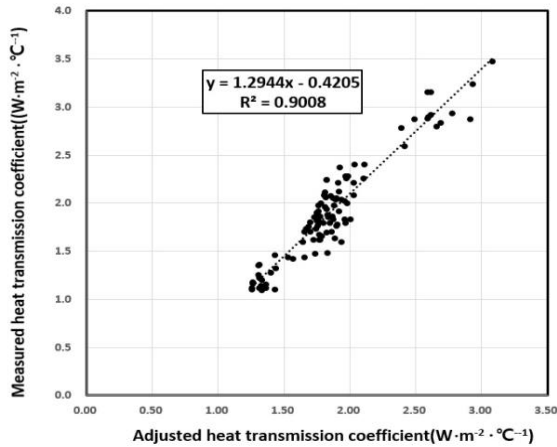


Fig. 7. Model estimated and measured heat transmission coefficients regression analysis diagram when installing multi-layers of cover and insulation material.

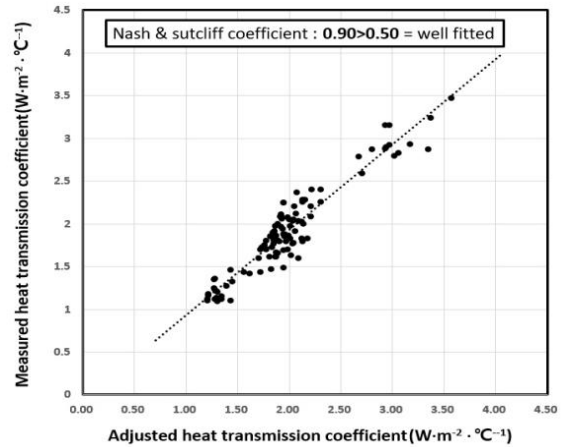


Fig. 8. Model estimated and measured heat transmission coefficients comparison diagram (1:1 equivalent line comparison) when installing multi-layers of cover and insulation material.

Table 4. Model estimated and measured heat saving rates comparison when installing multi-layers of cover and insulation material.

Num.	Item	Cover and Insulation materials				Estimated Heating load Coefficient (W·m ⁻² ·°C ⁻¹)	Heat saving rate (%)	
		First layer (thickness (mm))	Second layer (thickness (mm))	Third layer	Fourth layer		Estimated (Compared with PE film 0.15mm)	Measured (Relative error)
1	(Single span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	Multi-layer (5 layers) insulation curtain	-	1.2	79 = (5.6-1.2)/5.6×100	72(10%)
2	(Single span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	-	-	2.9	48 = (5.6-2.9)/5.6×100	57(16%)
3	(Double span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	Aluminium (4 layers) insulation curtain	-	1.2	79 = (5.6-1.2)/5.6×100	80(1%)
4	(Double span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	-	-	2.9	48 = (5.6-2.9)/5.6×100	46(4%)
5	(Double span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	-	-	2.9	48 = (5.6-2.9)/5.6×100	53(9%)
6	(Double span greenhouse)	POfilm (0.15)	POfilm (0.10)	Aluminium (4 layers) insulation curtain (shading rate : 55%)	Aluminium screen	0.8	85 = (5.6-0.8)/5.6×100	85(0%)
Comprehensive model estimation							Average Relative Error 2%	

의 연료소비량을 측정하여 비교시험을 실시하였다. 비교 시험 결과는 Table 4와 같으며 단동온실보다는 연동온실에서 오차가 적게 나타났고 평균적으로 예측된 열절감율이 실측치보다 상대오차 2%로 작게 나타나는 것으로 평가되었다.

2.3 온실 형태 및 지역별 온실 냉난방 부하 산정 모바일 웹 개발 및 제시

모바일기반의 온실 에너지계산 프로그램은 주소입력 기반으로 온실에서 가장 근접한 관측소의 위험을별 설계기온 및



Fig. 9. Greenhouse energy calculation program's menu and input/output screens.

시간별 표준기상자료(시간별 외기온, 최대 일사량 등)를 제공한다. 구성메뉴는 Fig. 9와 같으며 온실 형태별 최대난방부하, 기간난방부하(기간별 연료소비량), 주간 및 야간냉방부하, 온실표면적 계산 메뉴이다. 이 프로그램은 온실 피복(12종) 및 보온재(16종)의 개별 열관류율과 피복·보온재에 대한 조합별 열관류율 및 난방부하계수를 제공한다. 농민이 모바일(휴대폰)로 온실형태(비닐온실(단동형, 연동형), 유리온실(양지붕형, 벤로형)) 및 피복재, 보온재를 반영한 최대냉난방 부하 및 기간난방부하를 산정하여 대상 온실의 에너지 소비량에 대한 평가가 가능하다. 또한 온실형태, 피복 및 보온재의 최적 선택으로 에너지 절감형 온실 설계가 가능하다. 사용 방법은 모바일(개인 휴대폰)또는 일반 PC에서 <http://phri.iptime.org/apps/kr.re.arap.dec>로 접속 후 사용 가능하며 HTML5 웹 표준을 지원하는 구글 크롬(Chrome) 및 마이크로소프트 엣지(Edge) 브라우저 등에 최적화되어 있다. 또한 N-Screen 기술이 적용되어 다양한 단말 장치에서 사용이 가능하다.

적 요

모바일 기반 온실에너지 계산프로그램을 제작하기 위해 먼저 주요 단일 피복재 10종 및 보온재 16종에 대한 열관류율 측정하였다. 또한 피복 및 보온재를 이중 및 삼중으로 다층 설치할 때 열관류율 추정을 위하여 이중 설치시 24조합, 삼중 설치시 59조합에 대한 열관류율을 핫박스를 이용하여 측정하였다. 단일 피복재에서는 PE 필름(0.08mm) 대비 PO 필름(0.15mm)이 가장 열관류율이 가장 작고 열절감율이 가장 큰 것으로 나타났다. 단일 보온재에서는 열관류율에서는 외피가 있는 5겹의 다겹보온커튼이 가장 보온력이 좋은 것으로 나타났다. 또한 단일자재에 대한 열관류율 값과 열저항값을 이용한 피복

및 보온재의 다층설치시의 총 열관류율 값을 산정하였고 실측 값과의 오차를 보정하는 선형회귀식을 도출하였다. 단일재료의 열관류율값에 의한 피복 및 보온재의 다층설치시 열관류율 추정 모형을 개발한 결과 모형평가지수가 0.90(0.5 이상일 때 양호)으로 나타나 추정치가 실측치를 매우 잘 재현 하고 있는 것으로 나타났다. 또한 시험온실을 통한 실증시험결과 예측된 열절감율이 실측치보다 상대오차 2%로 작게 나타나는 것으로 평가되었다. 이러한 연구결과를 기반으로 모바일 기반의 온실 에너지계산 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 HTML5 표준 웹 기반 모바일 웹 애플리케이션으로 구현하였으며 N-Screen 지원을 통해 다양한 모바일 장치 및 PC 브라우저에서 동작이 가능하게 제작되었다. 또한 온실 피복(12종) 및 보온재(16종)의 조합별 열관류율 및 난방부하계수를 제공하여 농민이 모바일로 온실 위치, 형태 및 피복 보온재 등을 반영한 최대 주간 냉난방부하 및 기간 난방부하를 산정할 수 있다. 대상 온실의 에너지 소비량에 대한 평가가 가능하며 온실의 지역 및 형태에 따라 피복 및 보온재의 최적 선택으로 에너지 절감형 온실 설계가 가능할 것으로 판단되었다.

추가 주제어 : 냉난방비용 절감, 디지털 농업, 스마트 에너지

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구개발사업(과제번호:PJ0149670 12021)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

Hwang Y.Y., J.W. Lee, and H.W. Lee 2013, Estimation of

- overall heat transfer coefficient for single layer covering in greenhouse. *Protected Hort Plant Fac* 22:108-115 (in Korean). doi:10.12791/KSBEC.2013.22.2.108
- Kim M.G., S.W. Nam, W.M. Suh, Y.C. Yoon, S.G. Lee, and H.W. Lee 2000, *Agri-cultural structure engineering*. Hyangmunsa. Seoul. Korea. pp 159-166. (in Korean)
- Lee H.W., S. Diop, and Y.S. Kim 2011, Variation of the overall heat transfer coefficient of plastic greenhouse covering material. *J Bio-Env Con* 20:72-77. (in Korean)
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) 2019, *The status of greenhouse and vegetable production in 2018 ed.* Sejong, Korea. pp 107-122 (in Korean)
- National Institute of Agricultural Sciences (NIAS) 2010, *New Agricultural Energy Saving Technology*. pp 126. (in Korean)
- National Institute of Horticultural and Herbal Science (NIHHS) 2017, Available via <https://www.nihhs.go.kr/farmer/rdRslt/farmerUseProgram3.do>. (in Korean)
- Passive House Institute Korea (PHIK) 2017, Available via http://www.phiko.kr/bbs/board.php?bo_table=z3_01&wr_id=2479. (in Korean)
- Rural Development Administration, National Institute of Agricultural Sciences (RDA) 2015, *Design standards for greenhouse environment*, Wanju, Jeollabukdo, Korea. pp 79. (in Korean)
- Rural Development Administration (RDA) 2009, *Agricultural Facility Heat Loss Auditing Case Book*. pp 43-96, 165-167. (in Korean)
- Shin Y.S., J.E. Lee, H.W. Do, H. Chun, and D.S. Chung 2016, Effect of pol-yolefin film on korean melon quality and industry. *Protected Hort Plant Fac* 25:95-99. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2016.25.2.95
- W3C Editor's Draft 2010, Available via <https://dev.w3.org/html5/html-author/>. Accessed 30 May 2021.
- Yun S.W., S.Y. Lee, D.H. Kang, J.K. Son, M.J. Park, H.T. Kim, and D.K. Choi 2019, Comparison of thermal insulation of multi-layer thermal screens for greenhouse: results of hot-box test. *Protected Hort Plant Fac* 28:255-264. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2019.28.3.255