

난방 온실의 지중열 교환 특성에 관한 실험적 연구

신현호 · 남상운*

충남대학교 지역환경토목학과

Experimental Study on the Characteristics of Ground Heat Exchange in Heating Greenhouses

Hyun-Ho Shin and Sang-Woon Nam*

Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Abstract. The calculation method of ground heat exchange in greenhouses has different ideas in each design standard, so there is a big difference in each method according to the size of greenhouses, it is necessary to establish a more accurate method that can be applied to the domestic. In order to provide basic data for the formulation of the calculation method of greenhouse heating load, we measured the soil temperature distribution and the soil heat flux in three plastic greenhouses of different size and location during the heating period. And then the calculation methods of ground heat exchange in greenhouses were reviewed. The soil temperature distributions measured in the heating greenhouse were compared with the indoor air temperature, the results showed that soil temperatures were higher than room temperature in the central part of greenhouse, and soil temperatures were lower than room temperature in the side edge of greenhouse. Therefore, it is determined that the ground heat gain in the central part of greenhouse and the perimeter heat loss in the side edge of greenhouse are occurred, there is a difference depending on the size of greenhouse. Introducing the concept of heat loss through the perimeter of building and modified to reflect the size of greenhouse, the calculation method of ground heat exchange in greenhouses is considered appropriate. It was confirmed that the floor heat loss measured by using soil heat flux sensors increased linearly in proportion to the temperature difference between indoor and outdoor. We derived the reference temperature difference which change the direction of ground heat flow and the perimeter heat loss factor from the measured heat flux results. In the heating design of domestic greenhouses, reference temperature differences are proposed to apply 12.5~15°C in small greenhouses and around 10°C in large greenhouses. Perimeter heat loss factors are proposed to apply 2.5~5.0W·m⁻¹·K⁻¹ in small greenhouses and 7.5~10W·m⁻¹·K⁻¹ in large greenhouses as design standard data.

Additional key words : environmental design, heating load, perimeter, soil heat flux, soil temperature

서 론

우리나라에서 겨울철 시설재배를 위해서는 에너지 절감 대책으로 보온시설의 설치가 필수적이다. 국내 온실의 보온방식은 단동온실의 경우 다중피복 34%, 보온덮개 25%, 수막시설 13%, 다겹보온커튼 11% 등으로 나타나고 있으며, 연동온실은 부직포류 41%, 다겹보온커튼 33%, 알루미늄스크린 6.4% 등으로 나타나고 있다. 온실의 가온 면적은 13,980ha로 이중 85%가 경유 등의 유류를 난방연료로 사용하고 있다(MAFRA, 2014). 시설원에 생산비 중 난방비가 차지하는 비중이 30~40% 내외

로 매우 높고 난방연료도 대부분 유류로써 전량 수입에 의존하고 있어 시설원에 생산품 수출의 국제 경쟁력 면에서 크게 불리한 입장이기 때문에 난방비를 절감할 수 있는 방안들이 절실히 요구되고 있다(Lee 등, 2011).

시설재배에 있어서 난방설비의 용량 부족은 혹한기에 작물의 생육에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 또한 설비용량의 과대설계는 설치비 면에서 비경제적일 뿐만 아니라 에너지의 효율적 이용 측면에서도 불리하므로 적정 설비용량의 결정은 매우 중요하다(Nam 등, 2014). 적정 설비용량을 결정하기 위해서는 먼저 정확한 난방부하의 산정이 필요하다. 난방부하는 일반적으로 관류열부하, 틈새환기전열부하, 지중전열부하 등으로 구성되어 있다. 일본시설원예협회의 자료에 의하면 온실의 난방부하는 관류열부하 60~100%, 틈새환기전열부하 0~20%, 지중전열부하 -20~20% 정도로 구성되어 있다(JGHA, 2007). 그

*Corresponding author: swnam@cnu.ac.kr

Received July 07, 2016; Revised August 17, 2016;

Accepted August 18, 2016

러나 미국의 온실 설계기준에서는 지중전열부하를 고려하지 않고 있다(NGMA, 1983; ASABE, 2008). Shin과 Nam(2015)이 국내 1.2ha 규모의 온실에서 실험한 결과를 보면 관류열부하가 85~95%, 틈새환기전열부하가 4~10%, 지중전열부하가 0~6%로 나타났으며 난방부하 산정 방법과 온실의 규모에 따라서 상당한 차이를 보이므로 주의할 필요가 있다고 하였다.

지중전열부하는 온실 내의 지중에 저장된 열이 온실의 기온이나 일사 상태에 따라 증감되는 현상으로서(Kim 등, 1997), 야간에 난방 설정온도가 지온보다 높으면 난방부하를 증가시키고 반대로 지온보다 난방 설정온도가 낮으면 난방부하를 경감시키는 방향으로 작용한다. 또한 온실의 난방부하를 구하는 방법은 국가별로 차이를 보이고 있다. 관류열부하는 산정방법이 모두 동일하지만 틈새환기전열부하는 일본의 경우 환기전열계수와 온실의 피복면적을 이용하여 산정하고, 미국은 틈새환기율과 온실의 체적을 이용하여 구하고 있다. 지중전열부하는 일본에서는 실내외 기온차에 따른 경험치를 이용하여 구하는 반면 미국은 고려하지 않고 있다(JGHA, 2007; ASABE, 2008; Nam, 2013). 우리나라는 지중전열부하에 대하여 고시된 설계기준이 없지만 농어촌연구원의 환경설계 기준(안)에 따라 일본의 난방부하 산정방법과 동일한 방법을 사용하고 있다(Kim 등, 1997).

이와 같이 온실의 난방부하 중 지중전열부하는 산정방법이나 적용여부가 제각각이고, 온실의 규모에 따라 각각의 방법에는 큰 차이가 있으므로 보다 정확히 국내에 적용할 수 있는 방법을 정립할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 원예시설의 난방부하 산정방법 정립에 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 위치와 규모가 다른 3개의 연동 플라스틱 온실에서 난방기간동안 지온분포와 토양열류를 실측하였으며, 온실의 지중전열부하 산정방법을 검토하고 난방설계에 필요한 기준자료를 도출하였다.

재료 및 방법

Shin과 Nam(2015)은 대규모 플라스틱 온실에서 지중열류를 실측하여 지중전열부하를 분석하였으며, 온실의 외주부를 통한 열손실 개념을 도입한 새로운 지중전열부하 산정방법을 다음 식으로 유도하였다.

$$q_s = FL_p(\Delta t - \phi) \quad (1)$$

여기서, q_s 는 지중전열부하(W), F 는 온실의 외주부 단위 길이당 열손실계수($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), L_p 는 온실의 둘레길이(m), Δt 는 실내외 기온차($^{\circ}C$), ϕ 는 온실내부의 지중열 공급에 의한 부하저감 기준 온도차($^{\circ}C$)로 전체 지중전열

Perimeter

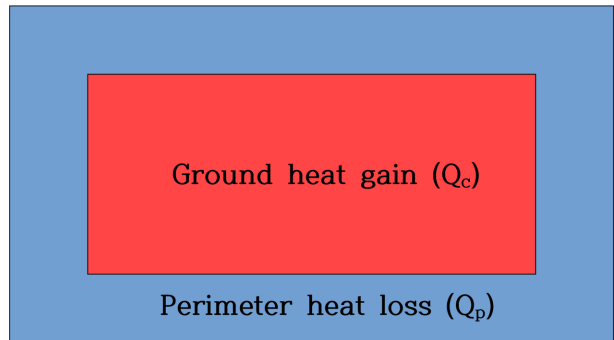


Fig. 1. Concept diagram of ground heat exchange for greenhouse heating load calculation.

의 방향이 바뀌는 시점의 실내외 기온차($^{\circ}C$)이다.

식 (1)의 유도과정은 다음과 같다. Fig. 1에서와 같이 온실의 중앙 부분에서는 낮 동안에 축적된 지중열이 공급되고, 온실의 측면 부분에서는 외주부를 통해서 열손실이 발생하는 개념이다. 바닥 난방을 하지 않는 콘크리트 슬래브 바닥은 바닥이나 지중으로 보다는 대부분 외주부(perimeter)를 통하여 열손실이 발생하며, 건물의 외주부를 통한 열손실량은 다음 식으로 구할 수 있다(SAREK, 2011; Spitler, 2010).

$$Q_p = FL_p \Delta t \quad (2)$$

온실 바닥으로부터의 지중열 획득량이 외주부를 통한 열손실량의 상수 배라고 가정하면 Q_c 는 다음 식 (3)과 같이 표시할 수 있다.

$$Q_c = kQ_p \quad (3)$$

열손실량은 부하를 증가시키고 열획득량은 부하를 경감시키는 방향으로 작용하므로 지중전열부하는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} q_s &= Q_p - Q_c \\ &= (1-k)FL_p \Delta t \\ &= FL_p(\Delta t - k\Delta t) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 식 (4)의 $k\Delta t$ 를 ϕ 로 대체하면 식 (1)과 같이 된다.

본 연구에서는 난방중인 온실에서 지온분포를 실측하여 온실의 외주부를 통한 열손실 개념 도입의 타당성을 검토하고, 규모가 다른 온실에서 지중열류를 실측하여 식 (1)의 F 값과, ϕ 값을 구해 온실 난방설계의 기준 자

Table 1. Size specifications and locations of experimental greenhouse.

| Greenhouse | Area (m ²) | With (m) | Length (m) | Height (m) | | Number of span | Location |
|------------|------------------------|----------|------------|------------|-------|----------------|----------|
| | | | | Eaves | Ridge | | |
| G1 | 2,160 | 24 | 90 | 6.0 | 7.2 | 3 | Cheonan |
| G2 | 840 | 21 | 40 | 4.5 | 6.5 | 3 | Buan |
| G3 | 11,900 | 128 | 93 | 5.0 | 7.2 | 16 | Buyeo |

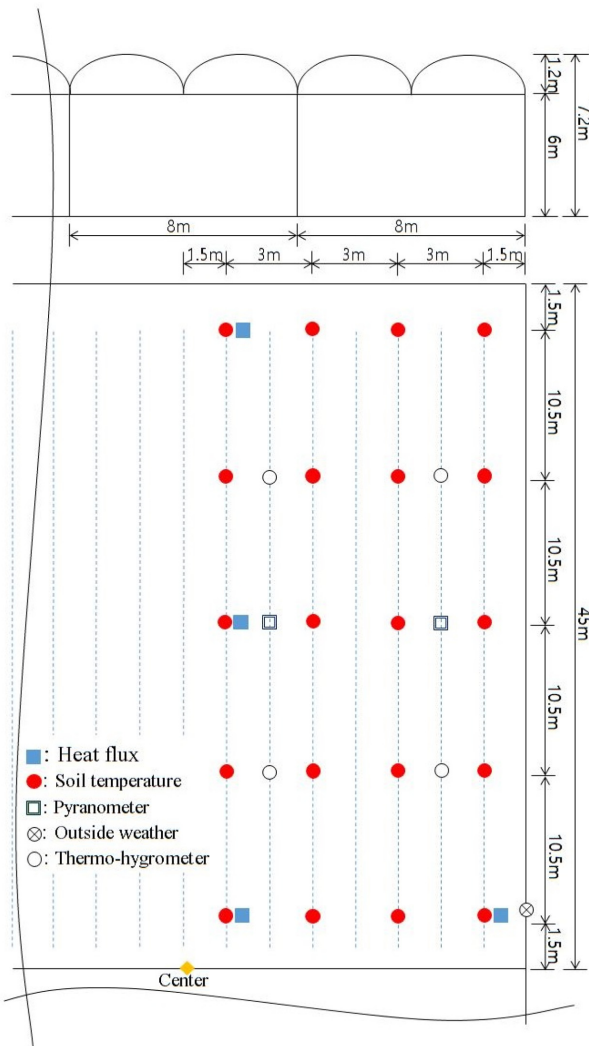


Fig. 2. Size of the experimental greenhouse and the layout of sensors.

료로 제공하고자 한다.

지중열류를 실측한 실험온실의 규격은 Table 1과 같다. 실험온실의 규격에서 관리동 면적은 제외한 것이다. G1 온실은 천안에 위치한 농업회사 세론의 농장 온실이고, G2 온실은 부안에 위치한 계화도 간척지의 실험온실이며, G3 온실은 부여에 위치한 농가의 온실로 16연동의 대규모 온실이다. G1 온실에서는 Fig. 2와 같이 온실을

4등분하여 온실의 중앙에서 길이방향 5점과 가로방향 4점, 전체 20점의 격자를 구성하여 지온을 계측하였다. 또한 4점에서 토양열류를 계측하고, 온실 내외부의 기상환경을 계측하였다. G2 온실에서는 중앙과 측면의 2점에서 토양열류를 계측하고, 온실 내외부의 기상환경을 계측하였다. G3 온실은 Shin과 Nam(2015)의 연구에서 실험한 온실로 본 연구에서는 대규모 온실의 실측자료를 비교하기 위하여 활용되었다.

Takura(1993)는 플라스틱 온실의 지온을 깊이별로 시뮬레이션하고 실측해본 결과 50cm 깊이에서는 일 변동이 거의 없고, 30cm 깊이까지만 기온의 영향을 받아 지온이 변동하는 것으로 보고하였다. 따라서 본 실험에서 열류센서는 지표면 바로 밑에 매설하고, 지온센서는 30cm 깊이에 매설하여 계측하였다.

지온은 열전대(K-type, Komets, Korea), 토양열류는 열류센서(MF-81, EKO, Japan), 기상환경은 온습도센서(MicroLogPro II, Fourtec, Israel), 일사센서(LP02, Hukseflux, Netherlands), 풍속센서(EE75, E+E Elektronik, Austria)를 이용하여 계측하였다. 실험온실에서는 모두 토마토를 수경재배하고 있으며, 난방은 모두 온수난방 방식이다. 지중열류 및 난방실험은 2014 12월부터 2015년 3월, 2015년 12월부터 2016년 3월에 걸쳐 수행하였다.

결과 및 고찰

온실로부터 지중으로의 열전달 특성을 파악하기 위하여 난방중인 온실의 지온분포를 실측하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 2015년 12월부터 2016년 3월까지 난방기간 중 오후 7시부터 다음날 아침 6시까지의 측정별 지온을 평균하여 종방향과 횡방향 변화를 도시한 것이다. 이 기간 동안 실내기온(난방온도)은 $15.4 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ 였다.

온실의 종방향 지온 변화를 살펴보면 Fig. 3에서 보는 바와 같이 온실 중앙의 지온은 18.4°C 를 나타낸 반면 중심에서 43.5m 떨어진 온실의 끝부분에서는 14.1°C 로 4.3°C 의 차이를 보였다. 측면을 따라 실측한 지온의 분포도 중앙부위는 16.2°C 를 나타낸 반면에 온실의 모서리 부분에서는 12.4°C 로 나타나 3.8°C 의 차이를 보였다. 지온 차이가 가장 큰 온실 중앙과 모서리 사이에는 6.0°C 의 지온 차이가 있는 것으로 나타났다. 실내의 난방 기온

과 비교하면 온실의 중앙부위는 열이 공급되고 있고, 온실의 끝부분과 모서리 부분에서 열손실이 일어나고 있음

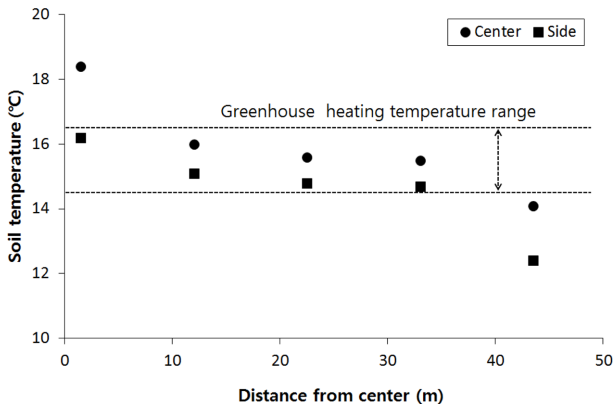


Fig. 3. Longitudinal soil temperature variation in a heating greenhouse.

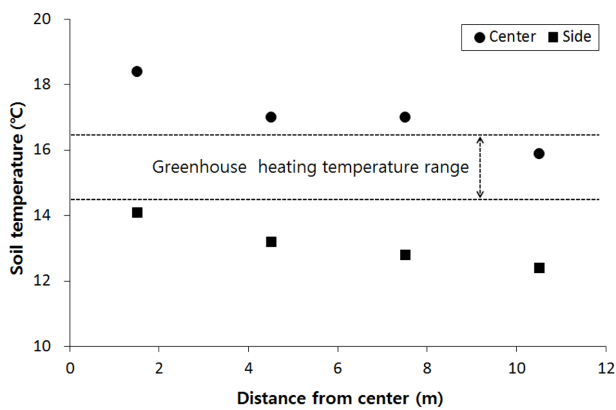


Fig. 4. Cross directional soil temperature variation in a heating greenhouse.

을 확인할 수 있다. 온실 중앙의 측면과 종방향 12~33m 구간의 측점에서는 실내기온 범위에 있기 때문에 난방부하에는 거의 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

온실의 횡방향 지온 변화를 살펴보면 Fig. 4에서 보는바와 같이 온실 중앙의 지온은 18.4°C를 나타낸 반면 중심에서 10.5m 떨어진 온실의 측면에서는 16.6°C로 1.8°C의 차이를 보였다. 끝부분을 따라 실측한 지온의 분포도 중앙부위는 14.1°C를 나타낸 반면에 온실의 모서리 부분에서는 12.4°C로 나타나 1.7°C의 차이를 보였다. 실내의 난방기온과 비교하면 온실의 중앙부위는 횡방향 10.5m 측점을 제외하면 대부분 열이 공급되고 있고, 온실의 끝부분에서는 모두 열손실이 일어나고 있음을 확인할 수 있다.

한편, 난방 기간 중 가장 추웠던 2016년 1월 25일의 시간별 지온분포를 등온선으로 표시하면 Fig. 5와 같다. 이날 실외기온은 0시에 -13.8°C, 5시에 -15.4°C까지 내려갔고, 6시에 -14.4°C, 12시에 -4.8°C, 18시에 -5.7°C, 24시에는 -7.1°C를 보였으며, 야간의 실내기온은 평균 14.3°C를 유지하였다. 그림에서 보는바와 같이 온실의 중앙에서는 지온이 15.6~16.5°C로 실내기온 보다 높게 나타났다. 온실의 모서리 부분은 지온이 10°C까지 내려가 매우 낮은 값을 보이고 있고, 온실의 끝부분과 측면 부분은 지온이 실내기온 보다 낮아 열손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터 지중전열은 온실의 중앙 부분에서는 지중열이 공급되고, 온실의 측면 부분에서는 외주부를 통해서 열손실이 발생하며, 온실의 규모에 따라 차이가 있을 것으로 판단된다. 따라서 건물의 외주부를 통한 열손실 개념을 도입하고, 온실의 규모를 반영하여 수정한 온실의 지중전열부하 산정방법은 타당성이 있는 것으로 평가된다.

Fig. 6과 Fig. 7은 실내외 기온차에 따른 지중전열부하를 나타낸 것이다. 지중전열부하는 온실 바닥에 설치된

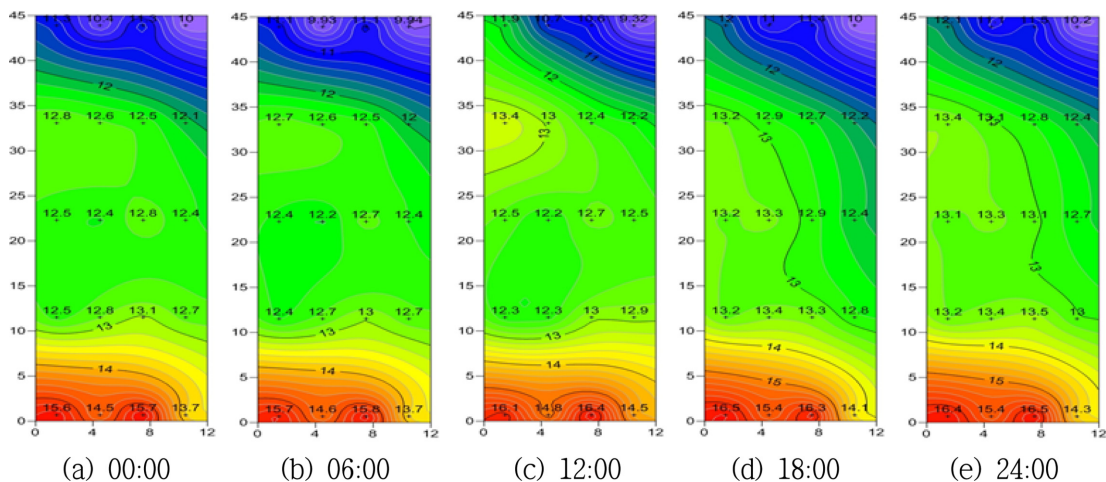


Fig. 5. Hourly variation of soil temperature distribution in a heating greenhouse (Jan. 25, 2016).

토양열류 센서를 이용하여 실측한 토양열류량의 평균값에 바닥면적을 곱하여 구하였다. 그림에서 보는바와 같이 지중전열량은 실내외 기온차에 비례하여 직선적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그림에 표시된 식에서 y값을 0으로 놓고 x를 구하면 지중전열의 방향이 바뀌는 기준온도차(ϕ)가 된다. 또한 직선의 기울기를 온실의 둘레 길이로 나누면 온실의 외주부 단위길이당 열손실계수(F)가 구해진다. 이와 같은 방법으로 구한 실험온실의 F와 ϕ 값은 Table 2와 같다.

먼저 지중전열의 방향이 바뀌는 기준온도차를 비교해 보면 G1 온실은 13.7°C, G2 온실은 12.5°C로 G3 온실의 10.0°C와 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 일본에서 실험한 자료에 의하면 지중열류의 부호가 바뀌는 기준온도차는 무가온 온실에서 22.5°C(Ogura, 1982), 난방 온실에서는 17.5°C(Mihara 등, 1980)로 보고되었다. 또한 고랭지나 북해도 및 동북지방 등의 추운지방에서는 15.0°C를 설계기준 온도차로 제시하고 있다(Mihara 등, 1980).

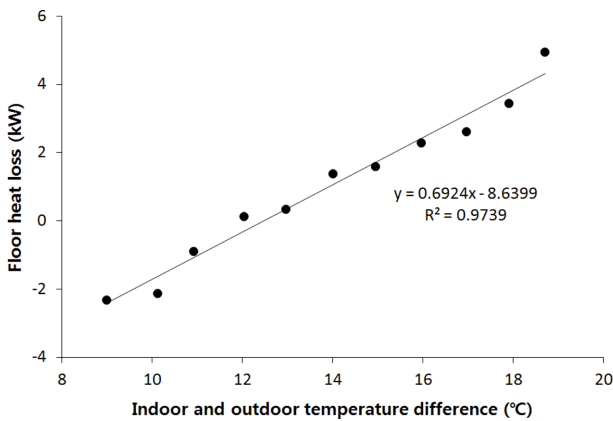


Fig 6. Measured ground heat exchange by difference between indoor and outdoor temperature in greenhouse G1.

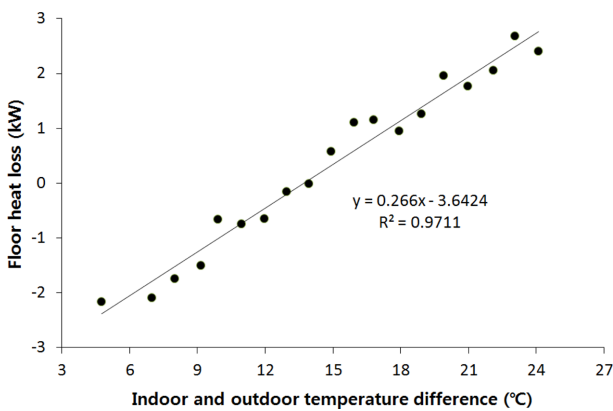


Fig 7. Measured ground heat exchange by difference between indoor and outdoor temperature in greenhouse G2.

본 연구의 G1 온실(0.2ha)과 G2 온실(0.1ha)은 일본의 추운지방과 비슷한 경향을 보이고, G3 온실(1.2ha)은 상당히 낮은 값을 보이고 있다. 즉, 본 실험 결과는 일본의 자료와 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 그 이유는 일본에서 실험한 온실이 대부분 0.1ha 미만의 소규모 온실이었기 때문으로 판단되며, 온실의 규모에 따라 다른 값을 적용할 필요가 있는 것으로 생각된다. 따라서 국내 온실을 설계할 때에는 온실의 규모에 따라 대규모 온실은 10°C 내외, 소규모 온실은 12.5~15°C를 적용할 것을 제안한다.

다음으로 온실의 외주부 단위길이당 열손실계수를 비교해 보면 G1 온실은 3.04W·m⁻¹·K⁻¹, G2 온실은 2.63W·m⁻¹·K⁻¹로 G3 온실의 10.5W·m⁻¹·K⁻¹와 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이것도 온실의 지온분포에서 살펴본 바와 같이 온실의 규모에 따른 차이로 판단된다. 따라서 국내 온실의 설계에서 지중전열부하를 구할 때는 온실의 규모에 따라 대규모 온실은 7.5~10W·m⁻¹·K⁻¹, 소규모 온실은 2.5~5.0W·m⁻¹·K⁻¹를 적용할 것을 제안한다.

온실의 난방부하 중에서 지중전열부하가 차지하는 비율은 실내외 기온차 10°C 이상의 범위에서 G1 온실은 -1.1~1.8%, G2 온실은 -1.1~1.4%로 나타나 G3 온실의 -0.2~6.3%와 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 일본에서 실험한 사례를 보면 온실의 지중전열부하는 전체 난방부하의 10% 이내이고(Mihara 등, 1978), 일반적인 규모의 상업용 온실에서는 무시할 정도라고 하였다(Kozai 등, 1982). 또한 미국에서는 온실의 규모가 크고, 난방온도를 대부분 16°C로 설정하며, 바닥은 콘크리트나 플라스틱 시트로 처리하기 때문에 지중전열부하를 고려하지 않고 있다(Albright, 1990; Lindley와 Whitaker, 1996). 본 연구 결과와 비교할 때 온실의 규모에 따라 다른 설계기준을 적용할 필요가 있을 것으로 판단된다. 일본의 설계기준을 적용하여 지중전열부하를 산정할 경우 전체 난방부하 중에서 지중전열부하가 차지하는 비중이 -28~20%로 계산되어 설계 기온에 따라서 과소 또는 과대평가될 가능성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 국내 온실의 설계에서 지중전열부하는 본 연구에서 제안된 온실의 외주부를 통한 열손실 개념을 도입한 지중전열부하 산정방법을 적용하고, 외주부

Table 2. Perimeter heat loss factor and reference temperature difference in experimental greenhouses.

| Greenhouse | Perimeter (m) | Perimeter heat loss factor (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | Reference temperature difference (°C) |
|------------|-------------------|--|---------------------------------------|
| G1 | 228 | 3.04 | 13.7 |
| G2 | 101 ²⁾ | 2.63 | 12.5 |
| G3 | 436 | 10.5 | 10.0 |

²⁾ Except the perimeter adjoining to the management building

단위길이당 열손실계수와 지중전열의 방향이 바뀌는 기준 온도차를 온실의 규모에 따라 차등 적용함으로써 보다 정확한 난방부하 산정이 가능할 것으로 판단된다.

적 요

온실의 난방부하 중 지중전열부하는 산정방법이나 적용여부가 제각각이고, 온실의 규모에 따라 각각의 방법에는 큰 차이가 있으므로 보다 정확히 국내에 적용할 수 있는 방법을 정립할 필요가 있다. 본 연구에서는 원예시설의 난방부하 산정방법 정립에 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 위치와 규모가 다른 3개의 연동 플라 스틱 온실에서 난방기간 동안 지온분포와 토양열류를 실측하였으며, 온실의 지중전열부하 산정방법을 검토하고 난방설계에 필요한 기준자료를 도출하였다. 난방중인 온실의 지온분포를 실측하여 실내기온과 비교한 결과 온실의 중앙 부분에서는 지온이 실내기온 보다 높고, 온실의 끝부분과 모서리 부분에서는 지온이 실내기온 보다 낮은 것으로 나타났다. 그러므로 온실의 중앙 부분에서는 지중열이 공급되고, 온실의 측면 부분에서는 외주부를 통해서 열손실이 발생하며, 온실의 규모에 따라 차이가 있는 것으로 판단된다. 건물의 외주부를 통한 열손실 개념을 도입하고, 온실의 규모를 반영하여 수정한 온실의 지중전열부하 산정방법은 타당성이 있는 것으로 평가된다. 토양열류센서를 이용하여 실측한 지중전열량은 실내외 기온차에 비례하여 직선적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 지중전열량 분석 결과로부터 지중전열의 방향이 바뀌는 기준온도차를 도출하였으며, 국내 온실의 난방설계에서 대규모 온실은 10°C 내외, 소규모 온실은 12.5~15°C를 적용할 것을 제안하였다. 또한 지중열류 실측 결과로부터 온실의 외주부 단위길이당 열손실계수를 도출하였으며, 대규모 온실은 7.5~10W·m⁻¹·K⁻¹, 소규모 온실은 2.5~5.0W·m⁻¹·K⁻¹를 설계기준 자료로 제안하였다.

추가 주제어 : 난방부하, 주변장, 지온, 토양열류, 환경설계

사 사

본 연구는 2015년도 충남대학교 CNU 학술연구비 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

Albright, L.D. 1990. Environment control for animals and plants. American Society of Agricultural Engineers, Michigan, USA.

American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). 2008. Standard: Heating, ventilating and cooling greenhouses. ANSI/ASAE EP406.4. ASABE, Michigan, USA.

Japan Greenhouse Horticulture Association (JGHA). 2007. Handbook of protected horticulture 5th edition. JGHA, Tokyo, Japan (in Japanese).

Kim, M.K., S.G. Lee, W.M. Seo, and J.E. Son. 1997. Design standards for greenhouse environment. Rural Development Corporation, Ansan, Korea (in Korean).

Kozai, T., T. Gunji, and I. Watanabe. 1982. Measurements and analyses of the daily heating load of a greenhouse. Journal of Agricultural Meteorology. 38(3):279-285 (in Japanese).

Lee, H.W., S. Diop, and Y.S. Kim. 2011. Variation of the overall heat transfer coefficient of plastic greenhouse covering material. J. of Bio-Env Control. 20(2):72-77 (in Korean).

Lindley, J.A. and J.H. Whitaker. 1996. Agricultural buildings and structures. ASAE, Michigan, USA.

Mihara, Y., M. Okada, and T. Takakura. 1980. Fundamentals and practices in greenhouse design. Yokendo Co. Ltd. Tokyo, Japan (in Japanese)

Mihara, Y., Y. Naitou, and T. Takakura. 1978. Investigations on the heating load of a large plastic greenhouse. J. Agr. Met. 33(4):189-193.

Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2014. Current status of greenhouses and products for vegetables in 2013. MAFRA, Sejong, Korea (in Korean).

Nam, S.W. 2013. Current status of greenhouse environmental design technique and comparison of standard weather data. Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers. 55(4):28-36 (in Korean).

Nam, S.W., H.H. Shin, and D.U. Seo. 2014. Comparative analysis of weather data for heating and cooling load calculation in greenhouse environmental design. Protected Horticulture and Plant Factory. 23(3):174-180 (in Korean).

National Greenhouse Manufacturers Association (NGMA). 1983. Heat-loss standard. NGMA. Littleton, USA.

Ogura, Y. 1982. Some results of actual observations of net radiation and soil heat transfer in unheated greenhouses. J. Agr. Met. 37(4):303-308.

Shin, H.H. and S.W. Nam. 2015. Validation of load calculation method for greenhouse heating design and analysis of the influence of infiltration loss and ground heat exchange. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 33(5): 647-657 (in Korean).

Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea (SAREK). 2011. Handbook of facilities engineering. Vol. 2 Air-conditioning. SAREK, Seoul, Korea.

Spitler, J.D. 2010. Load calculation applications manual. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, USA.

Takakura, T. 1993. Climate under cover: Digital dynamic simulation in plant bio-engineering. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.