

온실 난방시스템 설계를 위한 온수난방배관의 방열량 분석

신현호 · 남상운*

충남대학교 지역환경토목학과

Analysis of Heat Emission from Hot Water Pipe for Greenhouse Heating System Design

Hyun-Ho Shin and Sang-Woon Nam*

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

Abstract. The purpose of this study is to provide basic data for setting environmental design standards for domestic greenhouses. We conducted experiments on thermal environment measurement at two commercial greenhouses where hot water heating system is adopted. We analyzed heat transfer characteristics of hot water heating pipes and heat emission per unit length of heating pipes was presented. The average air temperature in two greenhouses was controlled to 16.3°C and 14.6°C during the experiment, respectively. The average water temperature in heating pipes was 52.3°C and 45.0°C, respectively. Experimental results showed that natural convection heat transfer coefficient of heating pipe surface was in the range of 5.71~7.49W/m² °C. When the flow rate in heating pipe was 0.5m/s or more, temperature difference between hot water and pipe surface was not large. Based on this, overall heat transfer coefficient of heating pipe was derived as form of laminar natural convection heat transfer coefficient in the horizontal cylinder. By modifying the equation of overall heat transfer coefficient, a formula for calculating the heat emission per unit length of hot water heating pipe was developed, which uses pipe size and temperature difference between hot water and indoor air as input variables. The results of this study were compared with domestic and foreign data, and it was found to be closest to JGHA data. The data of NAAS, BALLS and ASHRAE were judged to be too large. Therefore, in order to set up environmental design standards for domestic greenhouses, it is necessary to fully examine those data through further experiments.

Additional key words : bare pipe, design standards, developed length, heating pipe line, tube rail

서 론

온실의 난방방식은 온풍난방과 온수난방으로 구분되며, 방열관이 균일하게 배관되어 기온의 분포가 고른 등의 장점이 있는 온수난방 방식이 현대화 온실을 중심으로 많이 채택되고 있다. 온수난방 온실의 난방설계는 먼저 지역의 기상조건과 온실의 구조조건을 반영하여 난방부하를 산정하고, 이로부터 온수보일러의 설비용량을 결정 후, 온수난방 배관의 배치도를 작성해야 한다. 이때 난방열을 온실에 골고루 분포시키기 위해서 필요한 방열관, 즉 난방배관의 길이를 구해야 한다. 난방배관의 길이는 보통 온실의 최대난방부하(W)를 방열관의 단위 길이 당 방열량(W/m)으로 나누어 구한다(Nam 등, 2018).

현재 국내 온실의 난방설계 관련 기준은 명확하지 않으나 Kim 등(1997) 및 국립 농업과학원(NAAS, 2015)의 온실 환경설계기준(안)에서는 방열관의 재질에 따른 단위길이 당 방열량을 관의 호칭과 온도차(관내 온수온도와 실내기온의 차이)에 따라 제시하고 있다. 그러나 이 자료는 국내 여건에 따른 실험과 검증을 거친 자료가 아니라 국외 자료를 취합하여 일정 범위의 값을 정리하여 제시하고 있는 것으로써, 배관의 규격이나 온도범위 등이 문헌별로 제각각이고, 동일한 규격의 배관에서도 방열량 값에 차이가 있다(Hanan, 1998; Castilla, 2013; Nelson, 1991; JGHA, 2007; Balls, 1986; ASHRAE, 2001). 또한 미국 공기조화냉동공학회의 배관 방열량 자료를 보면 2001년 자료에 비하여 2013년 자료에서는 7.5~8.1%정도 작은 값을 제시하고 있다(ASHRAE, 2013).

최근 시설 현대화와 함께 신개념 온실의 등장(Nam 등, 2015), 식물공장이나 스마트팜과 같은 첨단온실의 확대 보급으로 난방시스템의 정밀 제어가 필요하므로, 현재의

*Corresponding author: swnam@cnu.ac.kr
Received May 1, 2019; Revised May 27, 2019;
Accepted June 7, 2019

온수난방배관 방열량 자료를 검증 없이 그대로 적용하는 것은 문제가 있고, 이 부분에 대한 명확한 설계기준이 제시될 필요가 있을 것으로 생각된다.

온실 난방배관의 방열량 자료를 구축하기 위해서 배관 규격과 온수의 온도 및 유량, 그리고 온실의 환경조건 등 모든 조건을 반영하여 실험하는 것은 불가능하다. 따라서 몇 가지 조건을 반영한 실측 실험을 통하여 난방배관의 열전달 특성을 분석하고, 이들을 난방배관 규격과 온수-실내공기 온도차의 함수로 수식화하면 모든 설계 조건의 방열량 자료를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 국내 온실의 환경설계 기준 설정에 필요한 기초자료를 제공할 목적으로 최근에 건설되고 온수난방 배관이 설치된 농가의 온실에서 난방 중 열환경 계측 실험을 실시하고, 온수난방 배관의 열전달 특성을 분석하여 난방배관의 단위길이 당 방열량 자료를 제시하고자 한다.

재료 및 방법

난방 배관의 열전달 특성을 분석하기 위하여 난방중인 온실에서 열환경 계측 실험을 수행하였다. 실험온실은 충남 천안에 위치한 연동 플라스틱 온실 2개동으로 토마토를 수경재배하고 있으며 규격은 Fig. 1과 같다. (a) 온실은 3.5연동 벤로 아치형으로 재배면적은 2,352m², (b)온실은 3연동으로 재배면적은 2,160m²이다.

두 온실 모두 온수난방을 실시하고 있으며, (a)온실의 주배관은 100A, 지선배관(튜브레이)은 40A를 사용하고 있고, (b)온실의 주배관은 65A, 지선배관은 40A를 사용하고 있다. 난방배관의 배치도는 Fig. 2와 같다. 각 온실별로 주배관(in), 주배관(out) 및 지선배관(튜브레이 배관 중 1라인을 선정)의 유량과 입구, 출구의 수온 및 25~30m 간격으로 배관 표면온도를 측정하였고, 온실의 실내온도를 16지점에서 측정하였다.

배관의 유량은 초음파유량계(GSA-500, Kometer, Korea), 배관의 수온 및 표면온도는 T형 열전대를 사용하여 계측하였으며, 데이터로거(GL220, Graphtec, Japan)를 이용하여 1분 간격으로 기록하였다. 실내온도는 온습도 로거(MicroLogPro II, Fourtec, Israel)를 이용하여 동일하게 1분 간격으로 계측하였다. 계측 데이터는 모두 1시간 간격으로 평균을 구하여 열전달 분석에 사용하였다. (a)온실에서는 2017년 12월 1일부터 2018년 1월 19일까지, (b)온실에서는 2018년 1월 20일부터 3월 10일까지 실험을 수행하였다.

난방배관의 방열량은 배관표면의 대류열전달계수를 분석한 후 배관 규격 및 온수-실내공기 온도차의 함수로 유도하였으며, 그 과정은 다음과 같다.

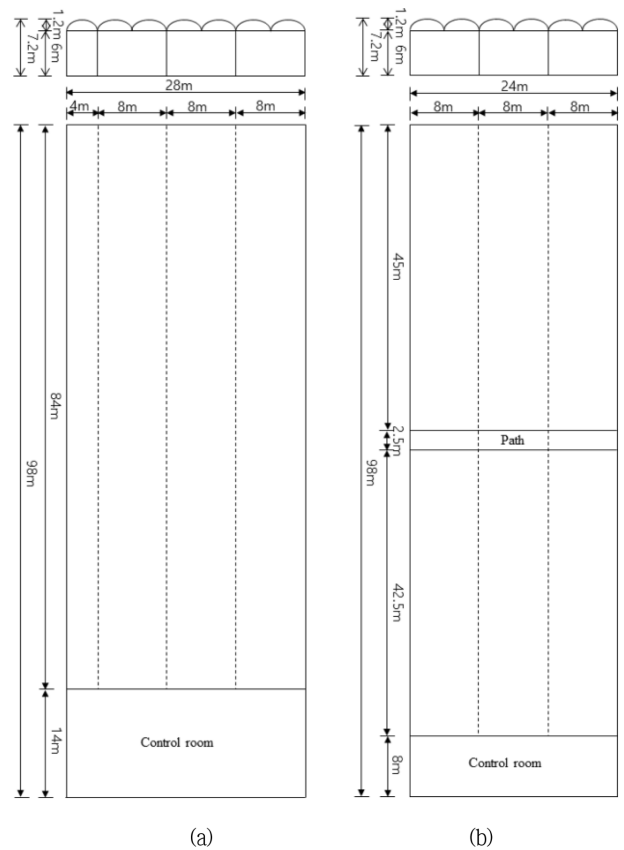


Fig. 1. Size of experimental greenhouses.

일정 구간의 난방배관을 통하여 온실로 공급된 열량은 온수의 유량과 파이프 입구 및 출구의 온도차로부터 다음 식으로 구할 수 있다.

$$q_s = m_w c_p \Delta t_{i_o} \quad (1)$$

여기서, q_s 는 온수로 공급된 열량(W), m_w 은 온수의 질량 유량(kg/s), c_p 는 물의 비열(J/kg°C), Δt_{i_o} 는 배관 입구(t_i)와 출구(t_o)의 온도차(°C)이다.

난방배관 표면에서 온실 공기로 전달된 방열량은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$q_c = h_o A_o \Delta t_{s_a} \quad (2)$$

여기서, q_c 는 난방배관 표면의 방열량(W), h_o 는 난방배관 표면의 대류열전달계수(W/m²°C), A_o 는 난방배관의 표면적(m²), Δt_{s_a} 는 난방배관 표면(t_s)과 실내 공기(t_a)의 온도차(°C)이다.

에너지보존법칙에 의하여 $q_s = q_c$ 이므로 실험 결과(m_w , t_i , t_o , A_o , t_s , t_a 는 계측)로부터 h_o 를 구할 수 있다.

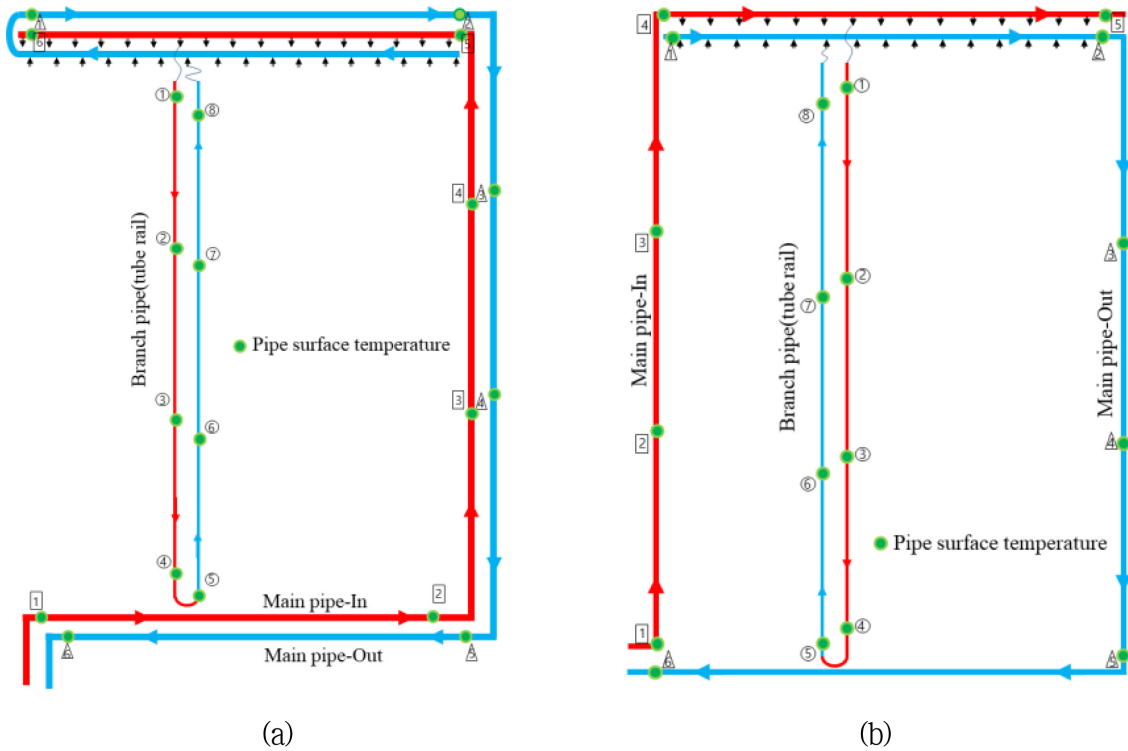


Fig. 2. Layout of heating pipes in experimental greenhouses.

$$h_o = \frac{q_s}{A_o \Delta t_{sa}} \quad (3)$$

한편, 열교환기 이론에서 파이프 내부를 흐르는 유체(물)에서 파이프 외부의 유체(공기)로 열이 전달되는 경우에 열전달량은 다음 식과 같다.

$$q = U_o A_o \Delta t_{wa} \quad (4)$$

여기서, Δt_{wa} 는 온수(t_w)와 실내 공기(t_a)의 온도차(°C)이고, U_o 는 외표면적(A_o) 기준의 관류열전달계수(W/m²°C)로써 다음 식과 같이 표현된다.

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(d_o/d_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o}} \quad (5)$$

위 식 (5)는 다음과 같이 정리하여 각각의 열저항으로 표시할 수 있다

$$U_o = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (6)$$

$$R_1 = \frac{d_o}{d_i h_i}, \quad R_2 = \frac{d_o \ln(d_o/d_i)}{2k}, \quad R_3 = \frac{1}{h_o} \quad (7)$$

여기서, A_i , A_o 는 난방배관의 내표면적, 외표면적(m²), d_i , d_o 는 난방배관의 내경, 외경(m), h_i , h_o 는 배관 내면과 외면의 대류열전달계수(W/m²°C), k 는 배관 재료의 열전도율(W/m°C)이다.

온실 난방설계를 위해서는 배관의 규격과 온수-실내공기의 온도차를 입력 자료로 선택해야 하므로 식 (4)를 기본으로 방열량을 구해야 한다. 즉, 난방배관 설계용 단위길이 당 방열량 자료는 다음 식으로 구해서 제공해야 한다.

$$q/L = U_o \pi d_o \Delta t_{wa} \quad (8)$$

여기서, q/L 은 난방배관의 단위길이 당 방열량(W/m)이고, 식 (2)와 (4)로 구한 열량은 같아야 하므로 실험으로 구한 h_o 를 열전달 이론을 바탕으로 아래의 식과 같이 U_o 로 변환하면 배관의 규격(d_o)과 온수-실내공기의 온도차(Δt_{wa})를 고려한 방열량 자료를 제시할 수 있다.

$$U_o = \frac{\Delta t_{sa}}{\Delta t_{wa}} h_o = \frac{R_3}{\sum R} h_o \quad (9)$$

온실 난방배관의 열전달 특성 분석에 적용한 파이프는 실험 온실에 사용한 파이프 외에 국내 온실 난방에 사

Table 1. Size of heating pipe using in analysis of heat transfer characteristics.

Nominal size	Diameter(mm)		Thickness (mm)	Outside surface area (m ² /m)
	Inside	Outside		
25A	29.4	34.0	2.3	0.107
32A	38.1	42.7	2.3	0.134
40A	44.0	48.6	2.3	0.153
50A	55.9	60.5	2.3	0.190
65A	71.7	76.3	2.3	0.240
80A	84.5	89.1	2.3	0.280
100A	109.7	114.3	2.3	0.359

용되고 있는 파이프를 모두 조사하여 적용하였으며 규격은 Table 1과 같다.

배관 내면의 열저항 R_i 또는 대류열전달계수 h_i 를 구하기 위해서는 파이프 내부 유체의 흐름이 층류인지 난류인지 구별해야 한다. Holman(1992)은 관 내부 흐름에서 레이놀드수가 2,300보다 크면 난류로 정의하고 있다. 레이놀드수는 관내의 유속과 관의 내경 및 유체의 동점성계수(온도에 따라 변함)로 계산되며, 난방 배관의 적정 유속범위 0.1~1.0m/s(SAREK, 2011)와 Table 1의 파이프 규격 및 온수의 온도범위 40~80°C를 적용하여 레이놀드수를 구해보면 4,500~300,000의 범위로 나타나 모두 난류인 것으로 판명되었다. 따라서 본 연구에서는 물의 튜브 내 난류에 대한 간략식(t 는 0~200°C까지 적용 가능)인 다음 식을 이용하여 h_i 를 계산하였다(Ko 등, 1990).

$$h_i = \frac{150(1+0.011t)(v)^{0.8}}{(d_i)^{0.2}} \quad (10)$$

여기서, h_i 는 온수난방 배관 내면에서의 대류열전달계수 (W/m²°C), t 는 물의 온도(°C), v 는 물의 유속(m/s), d_i 는 관의 내경(cm)이다.

배관 벽체의 열저항 R_s 는 강철의 열전도율 53.4W/m°C를 적용하여 계산하였다. 배관 외부 표면의 열저항 R_3 또는 대류열전달계수 h_o 를 구하기 위해서는 배관주변 공기의 자연대류 흐름이 층류인지 난류인지 구별해야 한다. Albright(1991)는 그레샷수(G_r)와 프란더틀수(P_r)의 곱인 레일리수(R_a)가 10⁴~10⁸의 범위일 때 공기의 흐름은 층류로 정의하고 있으며, 레일리수는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$R_a = G_r P_r = 10^8 (d_o)^3 \Delta t_{sa} \quad (11)$$

Table 1의 파이프 규격을 적용하고 Δt_{sa} 의 범위를 20~60°C로 설정하여 레일리수를 구해보면 8×10⁴~9×10⁶의 범위로 나타나 모두 층류인 것으로 판명되었다. 따라

서 본 연구에서는 층류 공기의 수평원통에 대한 간략식인 다음 식을 이용하여 h_o 를 계산하였다(Albright, 1991; ASHRAE, 2013).

$$h_o = c(\Delta t_{sa}/d_o)^{0.25} \quad (12)$$

여기서, h_o 는 온수난방 배관 외면에서의 대류열전달계수 (W/m²°C), c 는 상수로 Albright(1991)는 건조한 공기 20°C, 대기압 하에서 1.32를 제시하였고, ASHRAE(2013)는 21°C에 1.04를 채택하고 있다.

본 연구에서는 13~19°C 범위의 습공기 하에서 실험을 통하여 c 값을 유도하였다.

결과 및 고찰

Fig. 3은 실험온실 (a)에서 측정한 튜브레일의 표면온도 분포를 나타낸 것이다. 배관 입구의 수온 54.2°C, 출구 수온 50.4°C로 거리에 따라 거의 직선적으로 감소하고 있는 것으로 나타났다. 또한 온실의 실내기온은 평균 16.3°C(표준편차 1.3°C)로 나타났다. Fig. 4는 실험온실

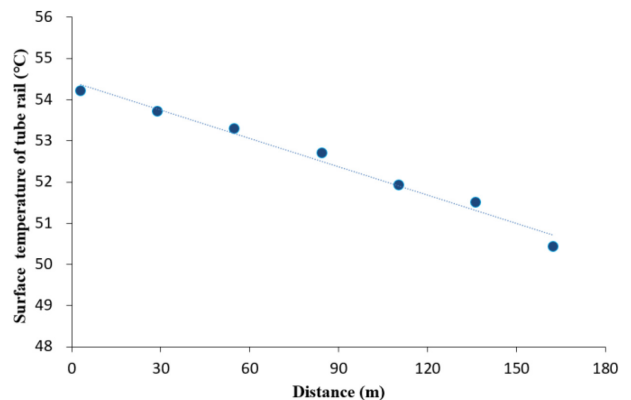


Fig. 3. Surface temperature of tube rail according to the distance from inlet of branch pipe in experimental greenhouse (a).

(b)에서 측정한 튜브레일의 표면온도 분포를 나타낸 것이다. 배관 입구의 수온 49.6°C, 출구 수온 40.3°C이었으며 마찬가지로 거리에 따라 거의 직선적으로 감소하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 온실의 실내기온은 평균 14.6°C(표준편차 1.1°C)로 나타났다. Fig. 3과 Fig. 4에서 보는바와 같이 (a)온실의 입구와 출구 온도차는 3.8°C이었으나 (b)온실의 경우에는 9.3°C로 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 그 이유는 (a)온실의 지선배관 유량이 0.42L/s인데 비하여 (b)온실의 유량은 0.14L/s로 배관 내의 유속 차이가 크기 때문으로 판단된다.

온수난방 방식의 온실에서 난방배관의 열전달에 관한 실험 결과로부터 유도된 배관 표면에서의 대류열전달계수 및 식 (12)의 상수 값은 Table 2와 같다. Table 2에서 난방배관을 통하여 공급되는 열량 q_s 는 계측치를 사용하여 식 (1)에 의해서 계산하였고, 난방배관 표면의 대류열전달계수 h_o 는 식 (3)으로 구하였다. 난방배관 표면의 대류열전달계수는 5.71~7.49W/m²°C(평균 6.70, 표준편차 0.70W/m²°C)의 범위로 분석되었다. 온실내의 토양이나 피복재 등의 표면에서 자연대류열전달계수는 온도차의 1/4승에 비례하고, 4.6~9.2W/m²°C의 범위에 있다고 보고한 Takakura(1993)의 결과와 비교하면 본 실험

데이터는 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.

수평원통 주변에서 층류 공기의 자연대류열전달계수는 파이프의 외경과 파이프표면-공기 온도차의 함수인 식 (12)의 형태로 잘 알려져 있다(Albright, 1991; ASHRAE, 2013). 실험데이터를 분석한 결과 Table 2에 나타난 바와 같이 c값은 1.33~1.54(평균 1.45, 표준편차 0.07)의 범위로 나타났다. 20°C의 건조한 공기에서 1.32(Albright, 1991), 21°C에서 1.04(ASHRAE, 2013)와 비교하면 약간 큰 값이지만 본 연구에서의 공기 조건은 13~19°C 범위의 습공기이므로 충분히 적용성이 있는 결과로 판단된다. 또한 6개 그룹의 변동계수가 4.92%로 크지 않으므로 평균 값을 이용하여 하나의 식으로 사용해도 문제가 없을 것으로 판단되며, 다음과 같이 유도하였다.

$$h_o = 1.45(\Delta t_{sa}/d_o)^{0.25} \quad (13)$$

난방배관 표면에서의 자연대류열전달계수를 실험을 통하여 구하였으며, 유도된 식 (13)에 의해 계산된 결과와 비교하면 Fig. 5와 같다. 본 식을 이용하여 난방배관 표면의 자연대류열전달계수를 추정하는 것이 가능하며, 이것을 기본

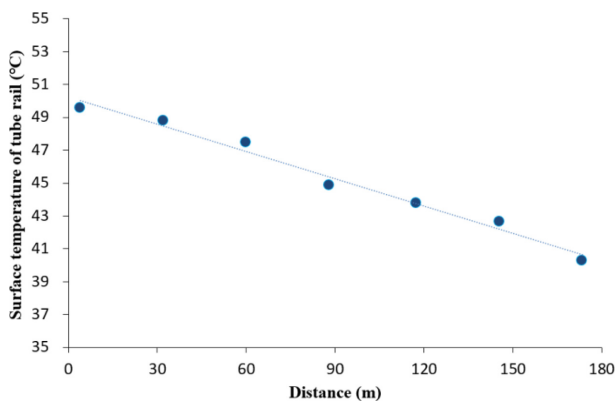


Fig. 4. Surface temperature of tube rail according to the distance from inlet of branch pipe in experimental greenhouse (b).

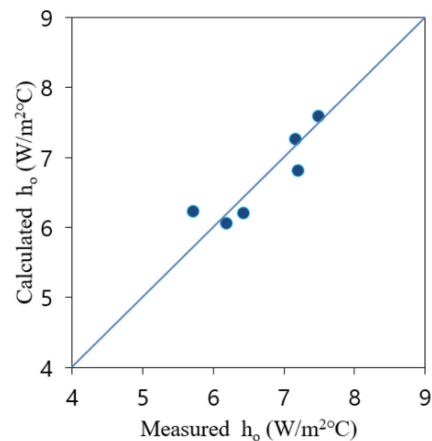


Fig. 5. Calculated and measured natural convection heat transfer coefficients in surface of greenhouse heating pipes.

Table 2. Natural convection heat transfer coefficients and constant values of equation (12) derived from this experiment.

Greenhouse	Pipe	Nominal size	m_w (kg/s)	Δt_{io} (°C)	q_s (W/m)	Δt_{sa} (°C)	h_o (W/m ² °C)	c^*
(a)	Main_in	100A	7.06	0.14	79.0	38.6	5.71	1.33
	Main_out	100A	7.06	0.26	76.5	34.5	6.18	1.48
	Branch	40A	0.42	3.79	41.2	36.0	7.49	1.44
(b)	Main_in	65A	2.17	0.59	63.7	36.9	7.20	1.54
	Main_out	65A	2.17	0.24	38.9	25.3	6.42	1.50
	Branch	40A	0.14	9.29	33.2	30.3	7.17	1.43

*) a constant value of equation (12)

으로 배관의 규격과 온수-실내공기의 온도차를 변수로 하는 난방배관 설계용 단위길이 당 방열량 자료를 도출하였다.

한편, 식 (7)에 의해 각 층의 열저항을 구해보면, R_2 는 관의 규격에 따라 $4.4 \times 10^{-5} \sim 4.6 \times 10^{-5} \text{m}^2\text{C/W}$ 로 작게 나타나 무시해도 될 것으로 판단되었다. 온수의 온도를 $40 \sim 80^\circ\text{C}$ 로 변화시키면서 관의 규격에 따라 R_1 을 구해보면, 관내의 유속이 0.1m/s 일 때 $0.032 \sim 0.049 \text{m}^2\text{C/W}$ 의 범위를 보였고, 유속이 0.5m/s 일 때 $0.009 \sim 0.014 \text{m}^2\text{C/W}$, 유속이 1.0m/s 일 때 $0.005 \sim 0.008 \text{m}^2\text{C/W}$ 의 범위를 보였다.

동일한 조건에서 분석하기 위하여 배관 표면온도를 온수의 온도와 같다고 가정하고 대류열전달계수를 ASHRAE (2013)의 식으로 계산하면 R_3 는 $0.149 \sim 0.268 \text{m}^2\text{C/W}$ 의 범위로 추정된다. 이 값을 적용하고 관의 규격과 수온을 동일한 조건끼리 매치시키면, 관내의 유속이 0.1m/s 일 때 R_3 은 $\sum R$ 의 $15.5 \sim 17.7\%$ 를 차지하고, 유속이 0.5m/s 일 때는 $4.9 \sim 5.7\%$, 유속이 1.0m/s 일 때는 $2.9 \sim 3.2\%$ 를 차지하는 것으로 분석되었다. 난방배관 내의 유속은 최소 0.1m/s 이상으로 해야 하고, 에어록 방지와 펌프 설치비의 경제성을 고려하면 $0.5 \sim 1.0\text{m/s}$ 범위의 유속이 바람직하다(Kim 등, 1997; SAREK, 2011; Nam 등, 2018). 따라서 관내의 유속을 0.5m/s 이상으로 유지할 경우 R_3 도 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

즉, 근사적으로 $\sum R \approx R_3$ 이 되고, $t_s \approx t_w$ 이므로 식 (8), (9), (13)으로부터, 난방배관 설계용 단위길이 당 방열량은 다음 식으로 유도될 수 있다.

$$q/L = 4.56(d_o)^{0.75}(\Delta t_{wa})^{1.25} \quad (14)$$

여기서, q/L 은 난방배관의 단위길이 당 방열량(W/m), d_o 는 관의 외경(m), Δt_{wa} 는 온수-실내공기의 온도차($^\circ\text{C}$)이다.

배관 표면온도를 관내의 수온과 같다고 보고 방열량을 계산할 경우의 오차를 구해보면, Table 3과 같다. 온수-실내공기의 온도차가 커질수록 오차는 줄어들지만 큰 차이는 없었고, 관내의 유속이 증가하면 오차는 크게 낮아지는 것을 알 수 있었다. 난방배관 내의 유속을 권장 유속인 0.5m/s 이상으로 유지하면 오차는 5% 이내로 비교적 정확한 설계가 가능할 것으로 판단된다.

유도된 식 (14)에 의해 난방배관의 단위길이 당 방열량을 구하고, 실험 결과와 비교하면 Table 4와 같다. 관경이 작은 튜브레이(40A)은 오차가 1% 정도를 보였고, 관경이 큰 주배관(100A)은 $2.1 \sim 8.4\%$, 전체 평균 3.6% 로 나타났다. 온실에 배치된 난방배관 중 주배관은 공급관과 회수관으로 사용되므로 수량이 많지 않고, 열을 분포시키는 지선배관(튜브레이)이 대부분을 차지하므로, 본 연구에서 유도된 방열량 예측 식은 온실의 난방설계에 적용하여도 문제가 없을 것으로 판단된다.

온실의 난방설계에서 난방열을 온실에 골고루 분포시키기 위해서 필요한 방열관, 즉 난방배관의 길이를 구하기 위해 사용하는 방열관의 단위길이 당 방열량 자료는 많은 문헌에서 제시하고 있다. Nelson(1991), Hanan(1998), Castilla(2013)의 자료는 배관의 규격이 국내에서 사용하

Table 3. Mean error(%) of calculated heat emission by velocity of water flow in pipe assuming that water temperature and surface temperature of pipe are the same.

Velocity of flow (m/s)	Temperature difference between water and air ($^\circ\text{C}$)				Mean error (%)
	30	40	50	60	
0.10	18.9	18.3	17.5	16.7	17.9
0.25	10.4	10.0	9.6	9.1	9.8
0.50	5.3	5.1	4.9	4.6	5.0
0.75	4.2	4.0	3.9	3.6	3.9
1.00	3.1	3.0	2.9	2.7	2.9

Table 4. Comparison of measured and predicted heat emission per unit length of heating pipe.

d_o (mm)	Δt_{wa} ($^\circ\text{C}$)	q/L (W/m)		Error (%)
		Predicted	Measured	
48.6	30.3	33.6	33.2	1.1
48.6	36.0	41.6	41.2	1.0
76.3	36.9	60.2	63.7	5.8
76.3	25.3	37.6	38.9	3.6
114.3	38.6	86.2	79.0	8.4
114.3	34.5	75.0	76.5	2.1

Table 5. Comparison of reference data on heat emission per unit length of heating pipe for temperature difference 55°C between water and air.

Pipe size	Heat emission (W/m)			
	ASHRAE (2013)	BALLS (1986)	JGHA (2007)	This study
40A	110	120	87	71
50A	135	150	105	83
65A	161	180	126	99
80A	193	210	142	111

고 있는 것과 달라서 비교가 불가능하고, 배관의 규격이 같은 것 중에서 ASHRAE(2013)는 온수-실내공기 온도차의 범위가 55~277°C이고, JGHA(2007)는 55~70°C의 범위, Balls(1986)는 40~120°C 범위의 방열량 자료를 제공하고 있다. 국내의 설계 자료는 NAAS(2015)에서 제공하고 있는데, Balls(1986)의 자료와 동일한 값을 제시하고 있다.

난방배관의 규격 40A, 50A, 65A, 80A와 온수-실내공기 온도차가 55°C로 동일한 조건의 방열량 자료(ASHRAE, 2013; BALLS, 1986; JGHA, 2007)를 본 연구에서 유도한 예측 식으로 구한 방열량과 비교한 결과를 Table 5에 나타내었다.

3개의 문헌에서 제시하는 방열량 자료는 본 연구 결과보다 상당히 큰 값을 보이고, 각각의 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 본 연구에서의 온수 온도는 50~55°C 정도의 저온 조건이고 ASHRAE(2013)는 높은 온도 범위에서의 자료이므로 차이의 원인으로 생각할 수 있으나, BALLS(1986)와 JGHA(2007)는 온실에 대한 자료임에도 불구하고 차이가 너무 크므로 어떤 것이 더 적합한지를 판단하기가 어렵다. 본 연구 결과는 3개의 자료보다 상당히 작지만 JGHA(2007)의 값과는 비교적 가깝게 나타나고 있으므로 BALLS(1986) 보다는 JGHA(2007)의 자료가 더 적합한 것으로 판단된다.

국내 온실의 난방설계에서 적용하는 NAAS(2015)의 값은 BALLS(1986)의 값을 따르고 있기 때문에 너무 큰 것으로 판단된다. 설계기준에서 방열관의 단위길이 당 방열량이 크면 온실에 배치해야 하는 방열관의 길이가 짧아도 되므로 난방열을 온실에 골고루 분포시키는데 필요한 난방배관이 부족하게 설계될 수도 있다. 따라서 국내 온실의 환경설계기준을 제정하고, 고시하기 위해서는 이 부분에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 국내 온실의 환경설계 기준 설정에 필요한 기초자료 제공을 목적으로 온수난방 방식을 채택하고 있는 상업용 온실 2곳에서 난방 중 열환경 계측 실험을

실시하고, 온수난방 배관의 열전달 특성을 분석하여 난방배관의 단위길이 당 방열량 자료를 제시하였다. 실험 기간동안 두 온실의 평균기온은 각각 16.3°C와 14.6°C로 조절되었으며, 난방배관의 온수 온도는 평균 52.3°C와 45.0°C로 관측되었다. 실험결과 난방배관 표면의 자연대류열전달계수는 5.71~7.49W/m²°C의 범위로 분석되었다. 난방배관 내의 유속이 0.5m/s 이상일 때에는 관내의 수온과 관 외부의 표면온도 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 난방배관의 관류열전달계수를 수평원통에서의 층류 자연대류열전달계수의 형태로 유도하였다. 유도된 관류열전달계수 식을 변형하여 관의 규격과 온수-실내공기의 온도차를 입력 변수로 하는 난방배관의 단위길이 당 방열량 산정식을 개발하였다. 본 연구 결과를 기존에 제공되고 있는 국내의 여러 자료와 비교한 결과 JGHA 자료와 가장 유사한 것으로 나타났다. 국내 온실의 설계에서 적용하고 있는 NAAS 자료와 국외의 BALLS 및 ASHRAE 자료는 값이 너무 큰 것으로 판단된다. 따라서 국내 온실의 환경설계기준을 제정하고, 고시하기 위해서는 추가적인 실험을 통해 이 부분에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

추가 주제어: 난방배관, 배관길이, 백관, 설계기준, 튜브레일

사 사

본 연구는 2018년도 충남대학교 CNU 학술연구비 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

Albright, L.D. 1991. Environment control for animals and plants. ASAE, Michigan, USA.
 ASHRAE. 2001. ASHRAE Handbook Fundamentals 2001. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
 ASHRAE. 2013. ASHRAE Handbook Fundamentals 2013. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

- Balls, R.C. 1986. Horticultural engineering technology: fixed equipment and buildings. Macmillan Education Ltd.
- Castilla, N. 2013. Greenhouse technology and management. CABI, Oxfordshire, UK.
- Hanan, J.J. 1998. Greenhouses: advanced technology for protected horticulture. CRC Press LLC.
- Holman, J.P. 1992. Heat transfer sixth edition. McGraw-Hill Book Company.
- JGHA. 2007. Handbook of protected horticulture 5th edition. Japan Greenhouse Horticulture Association (in Japanese).
- Kim, M.K., S.G. Lee, W.M. Seo, and J.E. Son. 1997. Design standards for greenhouse environment. Rural Development Corporation (in Korean).
- Ko, J.K., M.K. Kim, S.G. Lee, W.M. Seo, and H.R. Choi. 1990. Agricultural structures engineering. Seoul National University Press (in Korean).
- NAAS. 2015. Design standards for greenhouse environment. National Academy of Agricultural Science (in Korean).
- Nam, S.W., D.U. Seo, and H.H. Shin. 2015. Empirical analysis on the cooling load and evaporation efficiency of fogging system in greenhouses. Protected Horticulture and Plant Factory. 24(3):147-152 (in Korean).
- Nam, S.W., Y.C. Youn, H.W. Lee, I.B. Lee, H.T. Kim, J.W. Lee, and I.W. Seo. 2018. Agricultural structures engineering new edition. Hyangmoonsa Pub (in Korean).
- Nelson, P.V. 1995. Greenhouse operation and management. Prentice-Hall, Inc.
- Takakura, T. 1993. Climate under cover; Digital dynamic simulation in plant bio-engineering. Kluwer Academic Publishers.