

방열관의 배치와 관내 유속이 온수난방 온실의 온도분포에 미치는 영향

신현호¹ · 김영식² · 남상운^{1*}

¹충남대학교 지역환경토목학과, ²상명대학교 식물식품공학과

Effect of Pipes Layout and Flow Velocity on Temperature Distribution in Greenhouses with Hot Water Heating System

Hyun-Ho Shin¹, Young-Shik Kim², and Sang-Woon Nam^{1*}

¹Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Plant and Food Sciences, Sangmyung University, Cheonan 31066, Korea

Abstract. In order to provide basic data for uniformization of temperature distribution in heating greenhouses, heating experiments were performed in two greenhouses with a hot water heating system. By analyzing heat transfer characteristics and improving pipes layout, measures to reduce the variation of pipe surface temperature and to improve the uniformity were derived. As a result of analyzing the temperature distributions of two different greenhouses and examining the maximum deviation and uniformity, it was found that the temperature deviation of greenhouses with a large amount of hot water flow and a short heating pipe was small and the uniformity was high. And it was confirmed that the temperature deviation was reduced and the uniformity was improved when the circulating fan was operated. The correlation between the surface temperature of the heating pipe and the indoor air temperature was a positive correlation and statistically significant ($p < 0.01$) in both greenhouses. It was confirmed that the indoor temperature distribution in a hot water heating greenhouse was influenced by the surface temperature distribution of heating pipe, and the uniformity of indoor temperature distribution could be improved by arranging the heating pipe to minimize the temperature deviation. Analysis of the heat transfer characteristics of heating pipe showed that the temperature deviation increased as the pipe length became longer and the temperature deviation became smaller as the flow rate in pipe increased. Therefore, it was considered that the temperature distribution and the uniformity of environment in a greenhouse could be improved by arranging the heating pipe to shorten the length and controlling the flow velocity in pipe. In order to control the temperature deviation of one branch pipe within 3°C in the tube rail type hot water heating system most used in domestic greenhouses, when the flow velocity in the pipe is 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 m·s⁻¹, the length of a heating pipe should be limited to 40, 80, 120, 160, 200m, respectively.

Additional key words : greenhouse heating, hot water pipe, temperature deviation, tube rail, uniformity

서 론

국내 난방온실의 75%는 온풍난방 방식을 채택하고 있으며, 온풍기 전면의 온풍온도와 덕트 끝 지점의 온풍온도 차이로 인하여 온도편차가 4~7°C까지 생겨 기온분포가 불균일한 경우를 흔히 볼 수 있다(Yu 등, 2007; Lee 등, 2016). 이에 비하여 온수난방 방식은 난방배관(방열관)이 균일하게 배관되어 기온의 분포가 비교적 고른 장점이 있어 현대화 온실을 중심으로 많이 채택되고 있다(Yoon 등, 2012b). 온수난방 설계에서는 최대한방부하의

열을 온실에 공급하기 위해 소요되는 난방배관의 길이를 구한 후, 배관의 배치도를 작성하는데, 이때 난방열을 온실에 균일하게 분포시키기 위한 구체적인 방법은 제시되어 있지 않다(NAAS, 2015; Nam 등, 2018).

온실을 성공적으로 운영하기 위한 여러 목표 중 하나는 온실 내 미기상 환경을 얼마나 균일하게 유지하느냐 하는 것이다. 난방중인 온실에서 심한 온도편차로 인해 작물 생육이 불균일하여 수량 및 품질이 떨어지고 재배 기간이 연장되는 문제가 발생하고 있다(Nelson, 1995; Yu 등, 2007; Nam과 Kim, 2009). 온실 내 환경요인들의 균일성을 개선하는 가장 유효한 기술은 공기 순환을 촉진하는 것이라 하였고(Koths와 Bartok, 1985), 난방중인 온실에서 수행한 여러 연구에서 순환팬에 의한 온습도 편차의 감소를 확인하였다(Yu 등, 2007; Ishii 등, 2012).

*Corresponding author: swnam@cnu.ac.kr

Received June 27, 2019; Revised August 06, 2019;

Accepted September 03, 2019

재료 및 방법

순환팬을 이용하여 온실의 실내기온 분포를 균일화하기 위한 연구는 국내에서도 많이 시도되었다(Yu 등, 2007; Paek 등, 2013; Lee 등, 2016). 그러나 이들은 대부분 온풍난방 방식이거나 FCU를 사용한 온수난방 방식으로, 최근에 널리 보급되고 있는 튜브레이 방식의 방열관을 사용하는 온수난방 온실에 대한 온도분포 균일화 연구는 부족한 실정이다(Yoon 등, 2012a; Lee 등, 2017). 온수난방 온실에서 실내기온 분포를 균일화하기 위해서는 순환팬을 사용하는 방법도 있지만, 난방배관의 표면온도 편차를 크지 않게 유지하는 것이 중요한 것으로 판단된다. 난방배관의 표면온도 편차를 작게 유지하려면 관내의 유속을 빠르게 하든가 관의 배치를 개선하면 가능할 것으로 판단된다. 한편, 실내의 온도분포를 균일하게 하기 위한 배관방식은 직렬방식을 피하고 환원방식을 채택하는 것이 좋은 것으로 되어 있으나, 구체적인 분석 자료는 없다(JGHA, 2007; Nam 등, 2018).

따라서 본 연구에서는 난방온실의 온도분포 균일화를 위한 기초자료 제공을 목적으로 온수난방 방식의 토마토 재배 온실에서 난방실험을 통하여 난방배관의 표면온도와 실내기온 사이의 상관관계를 분석하고, 난방배관의 열전달특성 분석과 난방배관 배치의 개선을 통하여 난방배관 표면온도의 편차를 줄이고 균일도를 향상시키기 위한 방안을 도출하고자 한다.

난방 배관의 표면온도와 실내 기온 사이의 상관관계 분석을 위하여 난방중인 온실에서 열환경 계측 실험을 수행하였다. 실험온실은 충남 천안에 위치한 연동 플라스틱 온실 2개동으로 토마토를 수경재배하고 있으며 온실의 규격은 선행연구(Shin과 Nam, 2019)와 같고, 난방 배관의 배치도는 Fig. 1과 같다. (a)온실은 3.5연동 베로 아이치형으로 재배면적은 2,352m², (b)온실은 3연동으로 재배면적은 2,160m²이다.

두 온실 모두 온수난방을 실시하고 있으며, 난방열은 재배 베드 사이에 설치된 튜브레이(40A)을 통하여 실내 공기로 공급된다. 각 온실별로 16지점을 선택하여 가장 가까운 난방배관의 표면온도를 측정하였고, 재배공간인 보온커튼 설치 높이를 3등분하여 1.3, 2.6, 3.9m 높이에 온도 센서를 설치하여 실내온도를 48지점(16지점, 3층)에서 측정하였다. 온도 센서의 설치 위치는 Fig. 2와 같다.

그 외에 난방배관의 열전달 특성을 분석하기 위하여 배관의 유량과 입구 및 출구의 수온을 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

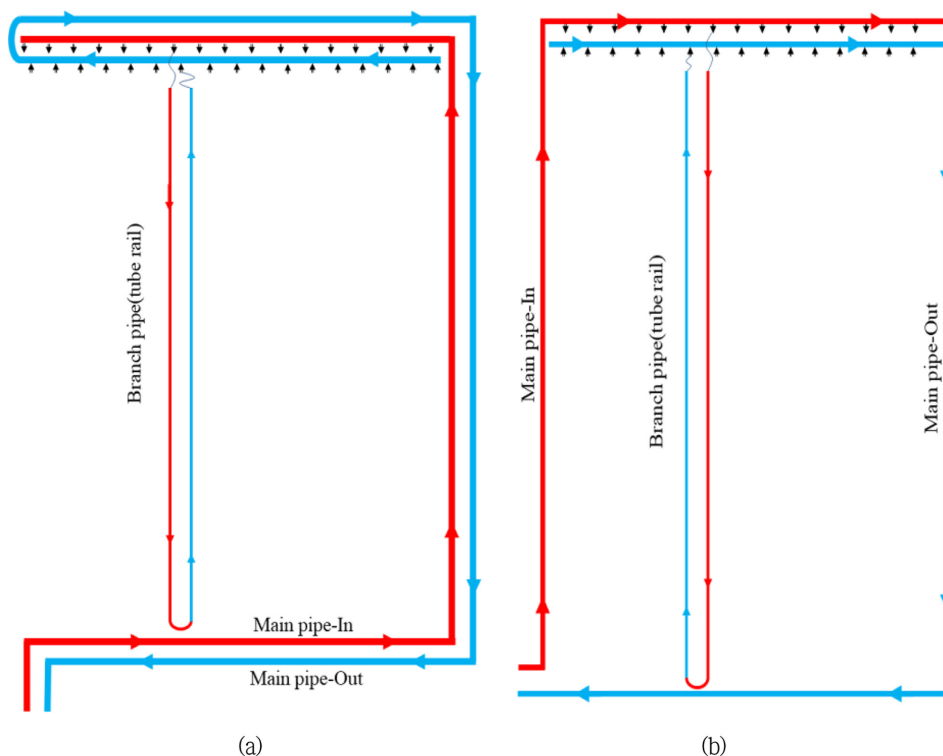


Fig. 1. Layout of heating pipes in experimental greenhouses.

방열관의 배치와 관내 유속이 온수난방 온실의 온도분포에 미치는 영향

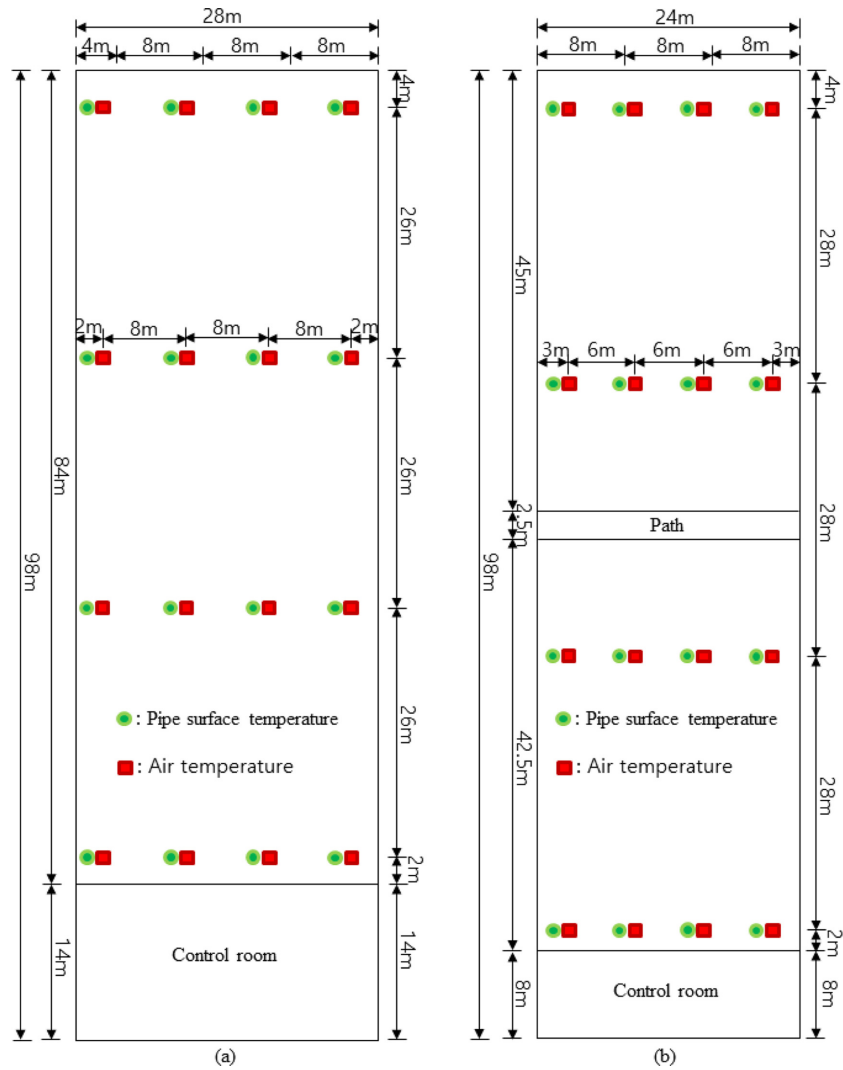


Fig. 2. Location of temperature sensors in experimental greenhouses.

(MicroLogPro II, Fourtec, Israel)를 이용하여 동일하게 1분 간격으로 계측하였다. 계측 데이터는 모두 1시간 간격으로 평균을 구하여 결과 분석에 사용하였다. (a)온실에서는 2017년 12월 1일부터 2018년 1월 19일까지, (b) 온실에서는 2018년 1월 20일부터 3월 10일까지 실험을 수행하였다.

온실 난방실험 데이터를 이용하여 다음과 같은 항목을 분석하였다.

첫째, 실험온실 내부의 온도분포를 분석하였다. 실내온도 환경의 균일성이 중요함에도 이를 나타내는 지표는 모두 온도의 최대편차를 사용하고 있다. 최대편차는 여러 측정 중에서 최대값과 최소값의 차이로써 일정한 기울기를 가질 경우에만 균일성의 지표로 사용할 수 있다. 만약 여러 측정 중에서 대부분 비슷한 측정값을 가지나 1~2점

만이 큰 편차를 보일 경우에 최대편차만으로 균일성을 판단하는 것은 문제가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 균등계수의 개념을 도입하여 다음 식(2)와 같이 균일도를 계산하여 비교하였다(Nam과 Kim, 2009).

$$\Delta T_{\max} = \theta_{\max} - \theta_{\min} \quad (1)$$

$$U = \left(1 - \frac{\theta_s}{\theta_{\text{avg}}}\right) \times 100 \quad (2)$$

여기서, θ 는 온도(°C), ΔT_{\max} 는 최대온도편차(°C), U 는 균일도(%), θ_{avg} 와 θ_s 는 각각 온도의 평균과 표준편차이다.

(a)온실과 (b)온실은 Fig. 1에서 보는바와 같이 배관의 배치가 다르고, 온수의 유량과 수온도 다르므로 이들 간의 차이를 비교하였다. 또한 (b)온실에는 순환팬이 설치되어

있어서 순환팬의 가동 유무로 나누어 비교 분석하였다.

둘째, 난방배관의 배치 개선을 통한 실내온도 균일화의 가능성을 판단하기 위하여 난방배관의 표면온도와 각 층별 실내기온 사이의 상관관계를 분석하였다. 상관관계는 통계패키지 프로그램 IBM SPSS Statistics 버전 24(IBM Corp., USA)를 이용하여 분석하였다.

셋째, 난방배관 내의 유량(유속) 조절에 의한 배관 표면온도 편차의 최소화를 위하여 난방배관의 열전달 특성을 분석하였다. 하나의 난방배관(튜브레일)을 통하여 온실로 공급된 열량은 온수의 유량과 파이프 입구 및 출구의 온도차로부터 다음 식으로 구할 수 있다.

$$Q_s = m_w c_p \Delta t_{io} \quad (3)$$

여기서, Q_s 는 온수로 공급된 열량(W), m_w 는 온수의 질량유량($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), c_p 는 물의 비열($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$), Δt_{io} 는 배관 입구(t_i)와 출구(t_o)의 온도차($^{\circ}\text{C}$)이다.

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

$$Q_g = q_e L_p \quad (4)$$

여기서, Q_g 는 난방배관 표면의 방열량(W), q_e 는 난방배관의 단위길이 당 방열량($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$), L_p 는 난방배관의 길이(m)이다.

국내 온실에서 튜브레일로 가장 많이 사용하는 40A 파이프(외경 48.6mm, 두께 2.3mm)에 대하여 관의 길이와 관내의 유속에 따른 온도편차(Δt_{io})를 식(3)과 식(4)를 이용하여 구하고, 편차 최소화에 의한 온도분포 균일화 방안을 검토하였다. 이때 식(4)의 난방배관 단위길이 당 방열량(q_e)은 문헌에서 제시하고 있는 값을 사용하였다(Balls, 1986; ASHRAE, 2013; Shin과 Nam, 2019).

결과 및 고찰

Table 1은 실험온실 내부의 기온분포를 분석하여 최대

편차와 균일도를 계산한 결과이다. (a)온실은 순환팬이 없었고, (b)온실은 순환팬을 가동할 때(On)와 가동하지 않을 때(Off)로 구분하여 분석하였다. (a)온실과 (b)온실의 Fan-off를 비교하면 난방배관(튜브레일)의 표면온도에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 최대편차와 균일도는 (a)온실이 3.2 $^{\circ}\text{C}$, 98.2%인데 비하여 (b)온실은 8.0 $^{\circ}\text{C}$, 94.5%로 나타났다. (a)온실의 튜브레일에 공급되는 온수의 유량은 25.2L $\cdot\text{min}^{-1}$, 수온 54.2 $^{\circ}\text{C}$ 이고, (b)온실의 튜브레일에는 8.4L $\cdot\text{min}^{-1}$, 49.6 $^{\circ}\text{C}$ 였다. 동일한 직경의 관을 사용하고 있으므로 관내의 유속차이가 온도편차를 크게 하고, 균일도를 떨어뜨린다는 것을 확인할 수 있었다.

기온분포도 높이별로 약간의 차이는 있지만, (a)온실에 (b)온실에 비해서 온도편차는 0.1~0.3 $^{\circ}\text{C}$ 정도 줄어 들고, 균일도는 1.2~1.6% 정도 개선되는 것을 볼 수 있다. 난방배관의 배치와 관내 유속의 조절에 의해 온도분포를 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

(b)온실에서 순환팬의 가동 유무에 따른 실내기온 분포를 비교하면, 순환팬의 가동으로 최대편차는 0.4~0.8 $^{\circ}\text{C}$ 감소하고, 균일도는 2.4~2.8% 개선되는 것으로 나타났다. 온수난방 온실에서도 순환팬 가동에 의한 환경의 균일화 효과를 확인할 수 있었다.

Table 2와 Table 3은 난방배관의 표면온도와 각 층별 실내기온 사이의 상관관계를 분석한 것이다. 두 온실 모두에서 유의적인($p < 0.01$) 정적 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 난방배관 표면온도와 각 층별 실내기온 사이의 상관계수를 비교해 보면 튜브레일에서 가까운 1.3m 높이 층의 실내기온이 가장 높은 상관관계를 보인다. 즉, 온수난방 온실에서 실내기온의 분포는 난방배관 표면온도의 분포에 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있고, 이는 온도편차가 최소화 되도록 난방배관을 배치함으로써 실내기온 분포의 균일도를 개선할 수 있음을 의미한다.

또한 (a)온실의 상관계수가 (b)온실의 상관계수보다 높게 나타나고 있는데, 이는 간선배관의 배치에 차이가 있을 뿐 아니라 (a)온실의 배관 유량이 (b)온실에 비하여

Table 1. Comparison of temperature distribution by hot water heating system and circulation fan.

Greenhouse	Circulation fan	Category	Temperature distribution			
			Tube rail surface	Air at 1.3m height	Air at 2.6m height	Air at 3.9m height
(a)	None	ΔT_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	3.2	4.6	4.2	3.8
		Uniformity(%)	98.2	91.3	91.2	92.5
(b)	On	ΔT_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	-	4.0	3.7	3.6
		Uniformity(%)	-	92.1	92.8	93.3
	Off	ΔT_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	8.0	4.7	4.5	4.0
		Uniformity(%)	94.5	89.7	90.0	90.9

크기 때문으로 생각된다. 즉, 난방배관 내의 유량 또는 유속을 조절함으로써 실내기온의 분포를 균일화 하는 것이 가능할 것으로 판단된다. Fig. 3과 Fig. 4는 온수난방 온실에서 난방배관의 표면온도와 각 층별 실내기온의 분포를 등온선으로 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보는바와 같이 (a)온실의 실내기온 분포는 난방배관 표면온도의

Table 2. Correlation coefficient between surface temperature of tube rail and indoor air temperature of each floor in greenhouse (a).

	Tube rail	Air_1.3m	Air_2.6m	Air_3.9m
Tube rail	1			
Air_1.3m	0.541**	1		
Air_2.6m	0.521**	0.973**	1	
Air_3.9m	0.517**	0.953**	0.971**	1

** . Correlation coefficient is significant at the 0.01 level (N=672).

Table 3. Correlation coefficient between surface temperature of tube rail and indoor air temperature of each floor in greenhouse (b).

	Tube rail	Air_1.3m	Air_2.6m	Air_3.9m
Tube rail	1			
Air_1.3m	0.473**	1		
Air_2.6m	0.463**	0.971**	1	
Air_3.9m	0.457**	0.945**	0.951**	1

** . Correlation coefficient is significant at the 0.01 level (N=672).

분포와 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. (b)온실의 온도분포 패턴은 Fig. 4와 같이 (a)온실에 비해서는 상관성이 조금 떨어지는 것으로 나타나고 있다.

한편, 재료 및 방법의 식 (3)과 식 (4)는 같아야 하므로 난방배관에서 입구와 출구의 온도편차는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta t_{io} = \frac{q_e L_p}{m_w c_p} \quad (5)$$

난방배관 표면에서의 단위길이 당 방열량이 일정하다면 온도편차는 난방배관의 길이에 비례하고, 온수의 유량에 반비례한다. 따라서 이 식으로부터 난방배관의 온도편차를 구하기 위해서는 배관 표면에서의 단위길이 당 방열량이 중요한 인자가 된다.

Albright(1991)와 ASHRAE(2013)는 층류 공기에 대한 수평원통에서의 자연대류열전달계수 계산식을 제시하고 있으며, 이를 이용하면 난방배관 표면에서의 단위길이 당 방열량을 구할 수 있다. 또한, Balls(1986), JGHA(2007), 및 ASHRAE(2013)는 온수와 실내공기의 온도차 및 파이프의 규격별로 단위길이 당 방열량 자료를 제시하고 있다. Shin과 Nam(2019)은 국내 온실에서의 실험 자료를 바탕으로 Albright(1991)와 ASHRAE(2013) 방식으로 대류열전달계수 식을 유도하고, 단위길이 당 방열량 자료를 도출하여 제시한 바 있다. 그러나 이들의 단위길이 당 방열량 자료는 Table 4에서 보는바와 같이

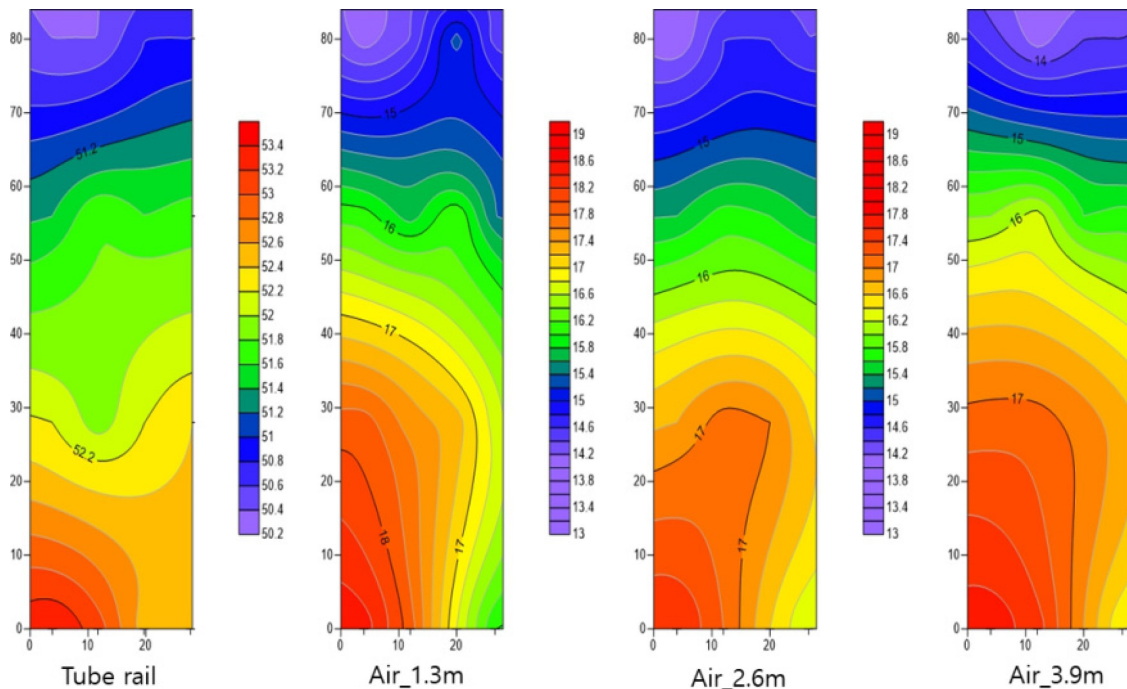


Fig. 3. Distribution plot for surface temperature of tube rail and indoor air temperature of each floor in greenhouse (a).

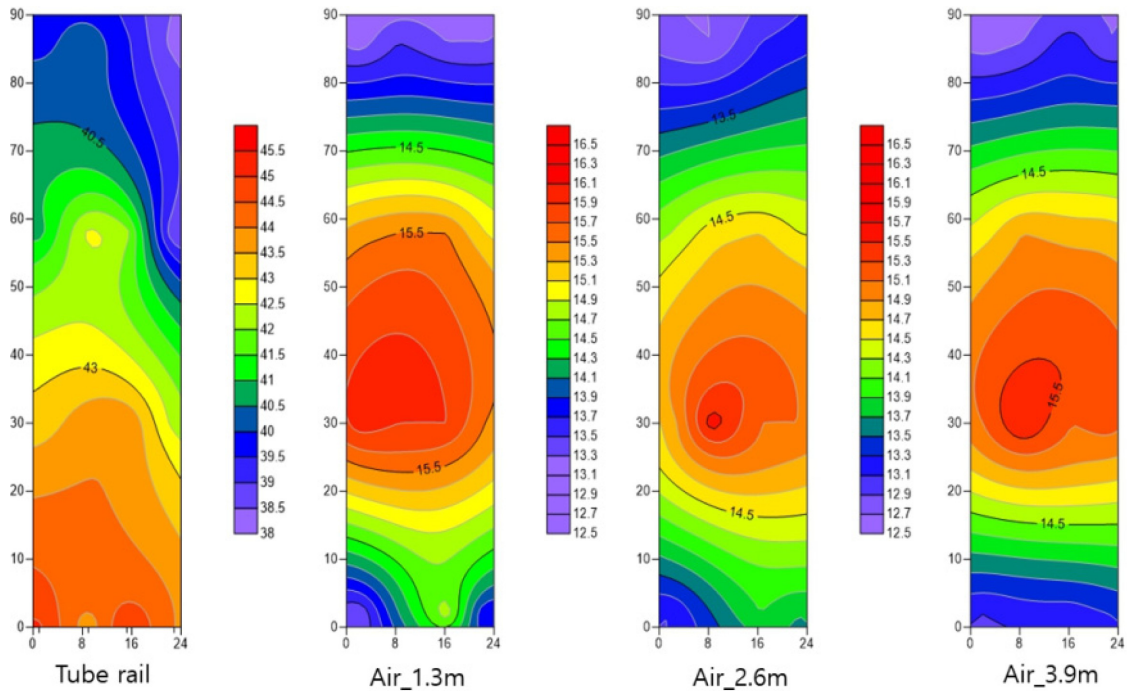


Fig. 4. Distribution plot for surface temperature of tube rail and indoor air temperature of each floor in greenhouse (b).

모두 큰 차이를 보이고 있으므로, 본 연구에서는 이들의 평균값을 적용하였다.

온수난방 배관의 수온과 온실 내 기온의 차이를 55°C로 설정하고, 지선배관인 튜브레일(40A) 한조의 길이와 관내 유속에 따른 온도편차를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\Delta T = 0.0153 \frac{L_p}{V_w} \quad (6)$$

여기서, L_p 는 난방배관의 길이(m), V_w 는 관내의 유속($m \cdot s^{-1}$), ΔT 는 배관 입구와 출구의 온도편차(°C)로써 L_p 구간에서의 온도강하이다.

식 (6)에 의해서 관내의 유속을 $0.2m \cdot s^{-1}$ 에서 $1.0m \cdot s^{-1}$ 까지 변화시키고, 배관의 길이를 40m에서 200m까지 변화시키면서 최대 온도편차를 구해보면 Fig. 5와 같다. 그림에서 보는데와 같이 배관의 길이가 길어지면 온도편차는 커지고, 관내의 유속이 빨라지면 온도편차는 작아지는 것을 알 수 있다. 따라서 지선배관의 길이가 짧아지도록 난방배관을 배치하고, 관내의 유속을 제어함으로써 온실의 온도분포와 환경의 균일성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 국내 온실에서 가장 많이 사용하고 있는 튜브레일 방식의 온수난방시스템에서 하나의 지선(branch line)에서의 온도편차를 3°C 이내로 조절하기 위해서는 관내의 유속이 $0.2m \cdot s^{-1}$ 일 경우 난방배관의 길이를 40m 이내로 제한해야 하며, 관내의 유속 0.4, 0.6,

Table 4. Reference data on heat emission per unit length of heating pipe for temperature difference 55°C between water and air.

Pipe size	Heat emission ($W \cdot m^{-1}$)				Average
	BALLS (1986)	JGHA (2007)	ASHRAE (2013)	Shin & Nam (2019)	
40A	120	87	110	71	97
50A	150	105	135	83	118
65A	180	126	161	99	142
80A	210	142	193	111	164

0.8, $1.0m \cdot s^{-1}$ 일 때 난방배관의 길이는 각각 80, 120, 160, 200m 이내로 제한해야 하는 것으로 나타났다.

적 요

본 연구는 난방온실의 온도분포 균일화를 위한 기초자료 제공을 목적으로 온수난방 방식의 토마토 재배 온실에서 난방실험을 통하여 난방배관의 표면온도와 실내기온 사이의 상관관계를 분석하고, 난방배관의 열전달특성 분석과 난방배관 배치의 개선을 통하여 난방배관 표면온도의 편차를 줄이고 균일도를 향상시키기 위한 방안을 도출하였다. 서로 다른 두 온실의 온도분포를 분석하여 최대편차와 균일도를 검토한 결과, 온수의 유량이 많고 난방배관의 길이가 짧게 배치된 온실의 온도편차가 작고,

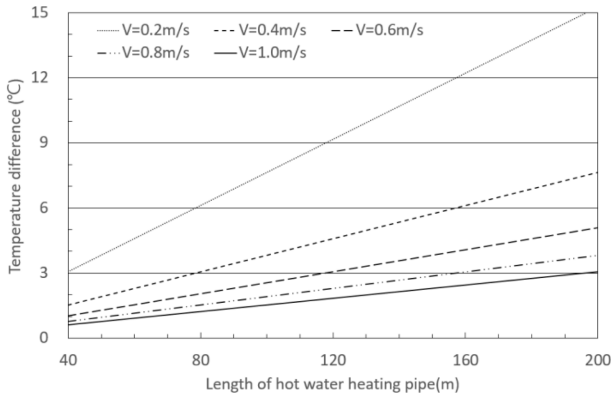


Fig. 5. Temperature difference of pipe surface according to the length of hot water heating pipe and flow velocity of water in the 40A standard pipe.

균일도는 높은 것으로 나타났다. 또한 순환팬을 가동한 경우에 온도편차는 작아지고 균일도가 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 난방배관의 표면온도와 실내온도 사이의 상관관계를 분석한 결과, 두 온실 모두에서 유의적인 ($p < 0.01$) 정적 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 온수난방 온실에서 실내온도의 분포는 난방배관 표면온도의 분포에 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었고, 온도편차가 최소화 되도록 난방배관을 배치함으로써 실내온도 분포의 균일도를 개선할 수 있는 것으로 판단되었다. 난방배관의 열전달 특성을 분석한 결과 배관의 길이가 길어지면 온도편차는 커지고, 관내의 유속이 빨라지면 온도편차는 작아지는 것으로 나타났다. 따라서 지선배관의 길이가 짧아지도록 난방배관을 배치하고, 관내의 유속을 제어함으로써 온실의 온도분포와 환경의 균일성을 개선할 수 있을 것으로 판단되었다. 국내 온실에서 가장 많이 사용하고 있는 튜브레이(40A) 방식의 온수난방시스템에서 하나의 지선배관에서의 온도편차를 3°C 이내로 조절하기 위해서는 관내의 유속이 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, $1.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 일 때 난방배관의 길이는 각각 40, 80, 120, 160, 200m 이내로 제한해야 하는 것으로 분석되었다.

추가 주제어: 균일도, 온도편차, 온수배관, 온실난방, 튜브레이

Literature Cited

Albright, L.D. 1991. Environment control for animals and plants. ASAE, Michigan, USA.
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.
Ishii, M., L. Okushima, H. Moriyama, and Y. Furihata. 2012. Influence of circulation fans on the distribution of air temperature and air velocity in a greenhouse. J. SHITA 24:193-200.
JGHA. 2007. Handbook of protected horticulture 5th edition. Japan Greenhouse Horticulture Association. (in Japanese)
Koths, B.J. and J.W. Bartok. 1985. The greenhouse environment. John Wiley & Sons. INC.
Lee, T.S., G.C. Kang, Y. Paek, J.P. Moon, S.S. Oh, and J.K. Kwon. 2016. Analysis of temperature and humidity distributions according to arrangements of air circulation fans in single-span tomato greenhouse. Protected Horticulture and Plant Factory 25:277-282. (in Korean)
Lee, T.S., G.C. Kang, H.K. Kim, J.P. Moon, S.S. Oh, and J.K. Kwon. 2017. Analysis of air temperature and humidity distributions and energy consumptions according to use of air circulation fans in a single-span greenhouse. Protected Horticulture and Plant Factory 26:276-282. (in Korean)
NAAS. 2015. Design standards for greenhouse environment. National Academy of Agricultural Science. (in Korean)
Nam, S.W., Y.C. Yoon, 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)
Nam, S.W. and Y.S. Kim. 2009. Analysis on the uniformity of temperature and humidity according to environment control in tomato greenhouses. Journal of Bio-Environment Control 18:215-224. (in Korean)
Nelson, P.V. 1995. Greenhouse operation and management. Prentice-Hall, Inc.
Paek, Y., J.G. Jeon, H.K. Kim, and N.K. Yun. 2013. Heating effect by using an electricity-powered hot water heater and fan coil unit in greenhouse. Journal of Korean Society of Mechanical Technology 15:785-789. (in Korean)
Shin, H.H. and S.W. Nam. 2019. Analysis of heat emission from hot water pipe for greenhouse heating system design. Protected Horticulture and Plant Factory 28(3):277-282. (in Korean)
Yoon, Y.C., Y.S. Shin, H.T. Kim, S.B. Bae, J.S. Choi, and W.M. Suh. 2012a. Heating performance of hot water supplying system in greenhouse. Journal of Bio-Environment Control 21:79-87. (in Korean)
Yoon, Y.C., Y.S. Shin, S.B. Bae, H.T. Kim, J.S. Choi, and W.M. Suh. 2012b. Variation of indoor air temperature by using hot water piping in greenhouse. Journal of Agriculture & Life Science 46:179-190. (in Korean)
Yu, I.H., M.W. Cho, S.Y. Lee, H. Chun, and I.B. Lee. 2007. Effects of circulation fans on uniformity of meteorological factors in warm air heated greenhouse. Journal of Bio-Environment Control 16:291-296. (in Korean)