

다선식 가온방식을 이용한 딸기 수경재배의 배지 온도조절 기술 개발

김기동¹ · 하유신² · 이기명² · 박대흠³ · 권순홍⁴ · 최원식⁴ · 정성원^{4*}

¹한양테크, ²경북대학교 생물산업기계공학과, ³태양그린에너지(주),

⁴부산대학교 바이오산업기계공학과

Development of Temperature Control Technology of Root Zone using Multi-line Heating Methods in the Strawberry Hydroponics

Ki Dong Kim¹, Yu Shin Ha², Ki Myung Lee², Dae Heum Park³,
Soon Hong Kwon⁴, Won Sik Choi⁴, and Sung Won Chung^{4*}

¹Hanyangtech Co., Daegu 702-050, Korea

²Dept. of Bio-Industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

³Sun Green Energy Co., Ltd., Daegu 711-892, Korea

⁴Dept. of Bio-Industrial Machinery Engineering, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea

Abstract. A multi-line electric tube consisted of XL pipes contained with 2~4 hot wires and water in it. The specification of one meter length multi-line electric tube was investigated and the proper number in the multi-line electric tube was determined. A multi-line electric tube with three hot wires were found to be the most efficient for the media heating control system. Temperature rise of medium in the rice hulls media was faster than that in the perlite media, showed better insulation effect of rice hulls media. Temperature rise of medium with mulching on the top of the bed was faster than without mulching, resulted in the beneficial effect of temperature rise with mulching. The regression model for the rice hulls media with mulching air temperature of 5°C were $a = -0.1458$ and $b = -0.1088$. Using the model, the temperature rise of medium during low temperature season can be predicted for the various media according to the different depths.

Key words : bed, heating, hydroponics, medium temperature, multi-line electric tube

서 론

딸기의 수경재배에서 지하부 온도에 대한 작물의 생육반응은 지상부 온도에 비하여 더욱 민감하고, 지하부 온도에 따라 생육특성이 매우 다르기 때문에 딸기의 품질 및 수량을 증대시키기 위해서는 지하부의 정밀한 온도조절이 필요하다(Jang 등, 1992; Jun 등, 2008; Udagawa 등, 1991).

일반적으로 저온기에 지하부의 가온방식은 온수순환식(Chang 등, 1997)을 이용하는데, 방열관의 길이가 길어질수록 시간당 유량이 적어지고 온수관의 온도가 떨어져 난방면적이 클 경우 배지 내의 온도변화폭이

크고 일정한 온도유지가 곤란하다는 문제점이 있다. 최근 이러한 단점을 보완하기 위하여 온수관의 전 길이로 된 전열선을 삽입하고 온수관에 물을 채워서 가열하는 난방기술이 개발되었지만(Park, 2005), 아직 농업적 이용 사례는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 딸기의 수경재배에서 전열선이 삽입된 온수관을 이용하여 배지의 지하부 온도를 관리할 수 있는 가온시스템을 개발하고 저온기 온실내 기온에 따른 온도분포 특성을 분석하여 그 적용성을 검토하였다.

재료 및 방법

Fig. 1과 같이 폭 300mm, 깊이 120mm의 사다리꼴 단면형상의 배지내에 Fig. 2의 1m 단위길이 가온 튜브(SUN UTH-50, Sun Green Energy Co., Korea)

*Corresponding author: chung@pusan.ac.kr

Received August 26, 2010; Revised October 10, 2010;

Accepted November 13, 2010

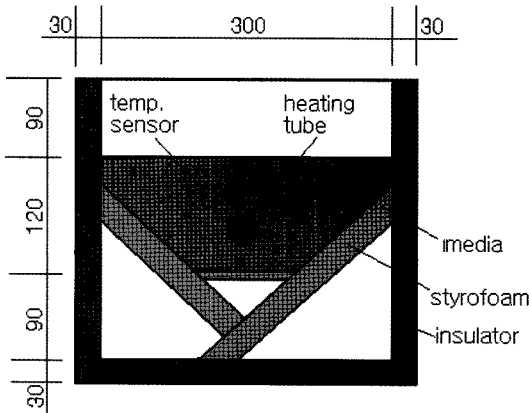


Fig. 1. Structures of the experimental bed and locations of temperature sensors.

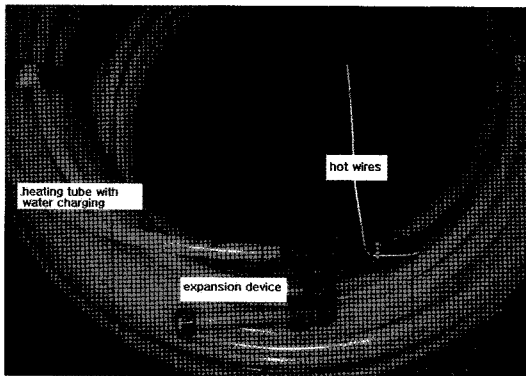


Fig. 2. PE tubes for heating contained multi-line electric wire.

를 설치하여 배지내 온도분포를 측정하였다. 가운데튜브는 XL관에 4선의 전열선을 물과 함께 봉입하였으며, 이때 4본의 전열선은 20, 15, 10, 5W/m이며 온도스위치에 의하여 단속할 수 있도록 구성하였다.

시험은 Fig. 3과 같은 알고리즘으로 가운데튜브에 봉입한 전열선 4선(5, 10, 15, 20W/m)을 설정온도(ST)에 따라 2선식[(5+15), (10+20)W/m], 3선식[10, 15, (5+20)W/m], 4선식(5, 10, 15, 20W/m)의 작동되도록 하여 전열선 수에 따른 제어방식(CM)에 대한 제어성을 비교하여 수경재배의 배지가온에 적합한 전열선 수 및 제어방식을 개발하고자 하였다. 2선식과 3선식은 각각 설정온도 20°C보다 3°C 낮은 17°C에서 온도스위치에 의해 2선식은 R2와 R4를 동시에 오프(off)하고, 3선식은 R4를 오프(off)하여 열선용량을 줄이고

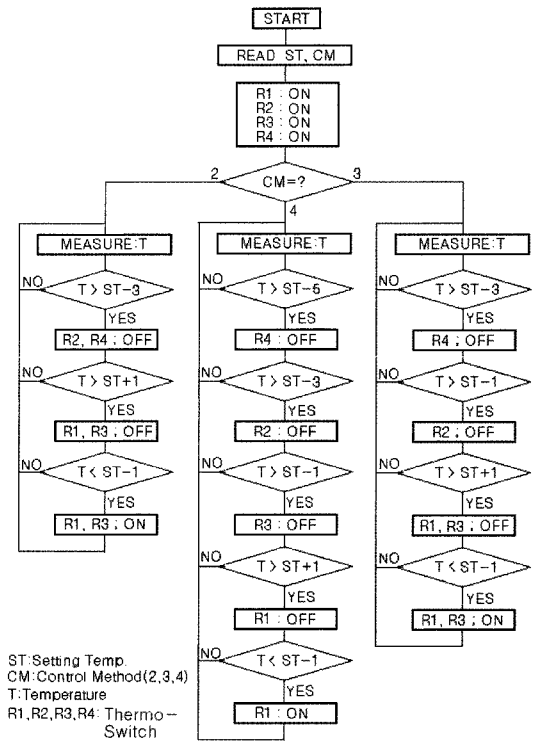


Fig. 3. A flow diagram of temperature control used a media heating device with multi-line electric tubes.

이후 2선식은 나머지 R1과 R3을 동시에 온(on)오프(off)하여 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 제어하며 3선식은 설정온도 1°C 낮은 19°C일 때 R2를 오프(off)한 후에 R1과 R3을 동시에 온(on)오프(off)하여 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 제어하는 알고리즘이다. 4선식은 설정온도보다 5°C 낮은 15°C일 때 R4를 오프(off)하여 전열선 용량을 설정온도보다 5°C 낮을 때부터 온(on)오프(off)하여 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 제어하는 알고리즘이다.

가운데튜브내 물의 온도가 25°C 일 때 배지 4종류(왕겨, 펄라이트, 왕겨80% + 피트모스20%, 펄라이트 80% + 피트모스20%), 멀칭 2종류(멀칭무, 멀칭)의 처리구별로 실내온도를 설정할 수 있는 항온실을 이용하여 온실기온 3수준(5, 10, 15°C)에 따른 배지 내 온도의 변화를 측정하였다.

또한, 측정된 배지 내 온도 변화로부터 멀칭 유무별, 깊이별(상중하) 배지온의 변화를 예측하였으며 예측식은 Newton equation을 이용하여 다음 식의 근사해를 유도하고(Holman, 2002), 근사해로부터 미분방정식을 도출하여 해를 계산하였다. 그 해는 반대수(semi.log)

눈금에서 직선의 방정식으로 나타낼 수 있으며 이를 이용하여 깊이별 온도상수 a, b 값을 산출한 후 지중 온도 변화를 예측하였다.

$$T = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty})be^{a\theta} \quad (1)$$

여기서, T는 특정시간 때의 배지온도(°C), T_∞는 가온튜브 내 온도(°C), T₀는 초기 배지온도(°C), a와 b는 위치별 온도상수, θ는 가동시간(h)을 나타낸다.

결과 및 고찰

Fig. 4는 제어방식 2선식, 3선식, 4선식의 3가지 방식에 대하여 가온튜브 표면온도를 20°C로 설정하였을 경우 제어방식별로 가온튜브 표면온도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 가온튜브 표면온도가 10°C 일 때 가온하기 시작하여 설정온도 20°C까지 도달하는데 2선식과 3선식은 가온시작에서 30분만 도달하였으며 4선식은 105분 후에 도달하였다. 이것은 4선식이 설정온도보다 5°C 낮은 15°C 일 때 R4를 오프

(off)하여 전열선 용량을 설정온도보다 5°C 낮을 때부터 전기용량을 낮게 유지하였기 때문이며, 온도 변화 진폭이 적게 나타났으므로 설정온도에 도달한 후에는 R1에 의하여 소용량(20W/m)으로 제어함으로써 정밀한 제어가 된 것으로 판단된다. 제어 결과로는 3선식이 설정온도 도달성이나 제어된 온도폭 등으로 볼 때 가장 제어능력이 좋은 것으로 판단된다.

배지별 4종류, 멀칭 유무별 2처리, 가온별 3처리(5, 10, 15°C)의 시험조건에 대하여 3선식 가온튜브에 의한 배지가온시 배지에 설치한 8개점의 온도변화 측정 예를 Fig. 5에 나타냈다. 가온 5°C에서 멀칭을 하지 않은 경우 배지온도가 안정될 때까지의 시간이 왕겨는

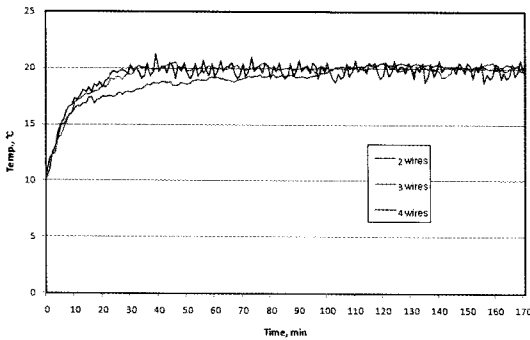
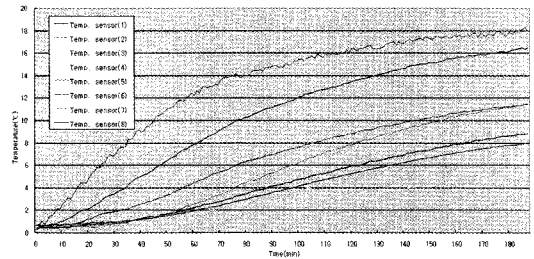
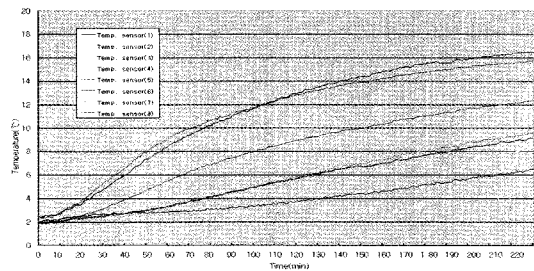


Fig. 4. Characteristics of temperature control by multi-line electric heating methods.

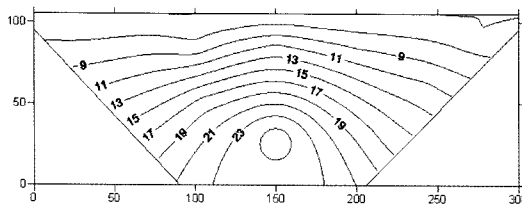


(a) Rice hulls

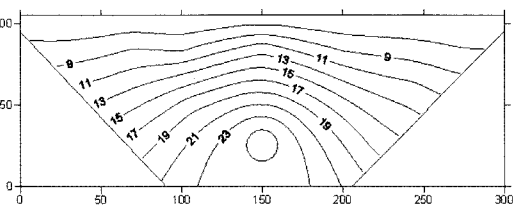


(b) Pearlite

Fig. 5. Changes of temperature at the sensor locations in case with non-mulched plant bed at air temperature of 5°C.

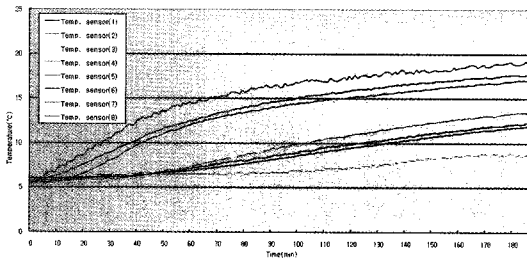


(a) Rice hulls

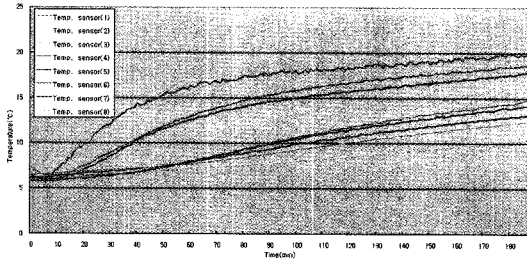


(b) Pearlite

Fig. 6. Comparison of temperature distributions for rice and pearlite media at the stable condition without mulching air temperature of 5°C.



(a) Without mulching



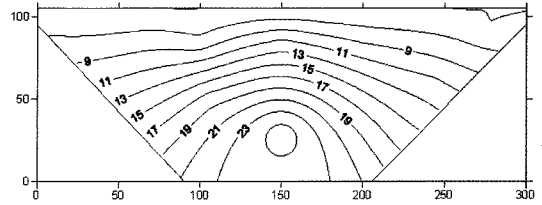
(b) With mulching

Fig. 7. Changes of temperature at the sensor locations for rice hulls media in the plant bed (air temperature of 10°C).

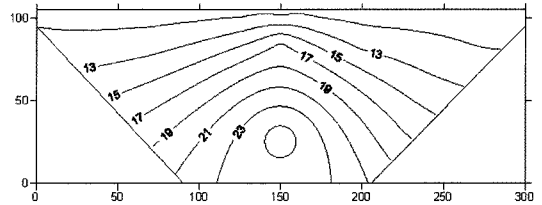
180분 필라이트는 220분으로 왕겨가 안정되는 시간이 빨랐다. 이것은 왕겨와 필라이트의 비열의 차이 때문이라고 판단된다.

한편 배지 온도가 안정되었을 때 배지별 온도분포를 Fig. 6에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 왕겨배지 필라이트 배지 모두 배지온이 안정되었을 때는 온도 분포가 비슷한 양상을 나타냈다.

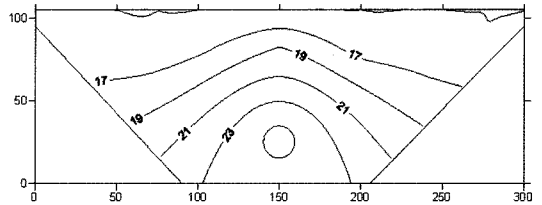
멀칭 유무에 따른 배지의 가온특성을 분석한 결과 Fig. 7에서와 같이 기온 10°C에서 왕겨배지의 멀칭 유무에 따라 배지온도가 안정될 때까지의 시간이 멀칭을 하지 않은 경우는 230분, 멀칭한 경우는 180분으로 멀칭의 경우가 배지온이 안정되는 시간이 빠르게 나타났다. 이것은 멀칭에 의하여 배지로부터의 방열이



(a) Air temperature of 5°C



(b) Air temperature of 10°C



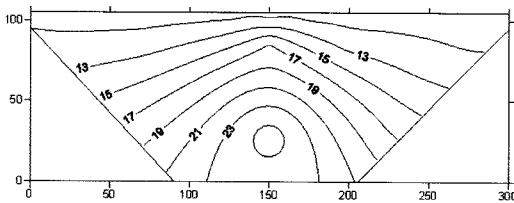
(c) Air temperature of 15°C

Fig. 9. Comparison of temperature distributions for rice hulls media without mulching.

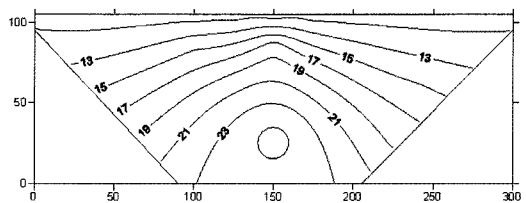
감소함으로써 나타나는 현상이라고 생각되며, 멀칭은 잡초발생 방지 목적이 크지만 배지온 관리면에서도 아주 효과적이라고 생각된다.

한편 온도가 안정되었을 때 멀칭 유무별 배지온도 분포를 Fig. 8에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 왕겨배지 상부에 멀칭 유무에 상관없이 모두 배지온이 안정되었을 때는 온도 분포가 비슷한 양상을 나타냈다.

Fig. 9는 왕겨 배지의 기온별 온도분포를 나타낸



(a) Without mulching



(b) With mulching

Fig. 8. Comparison of temperature distributions for rice hulls media according to with and without mulching.

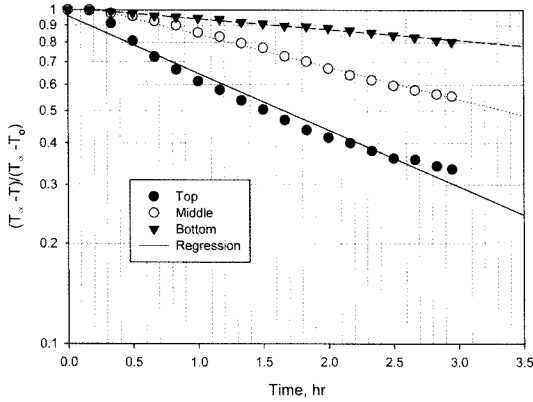


Fig. 10. Newton equation constants by media type and depth in the plant (Rice hulls-without mulching-air temperature of 15°C).

것이다. 그림에서 보는 바와 같이 가온 파이프 내의 온수 온도를 25°C로 하였을 때 기온에 따라 배지내 온도 분포는 기온이 낮을수록 배지온도의 깊이별 온

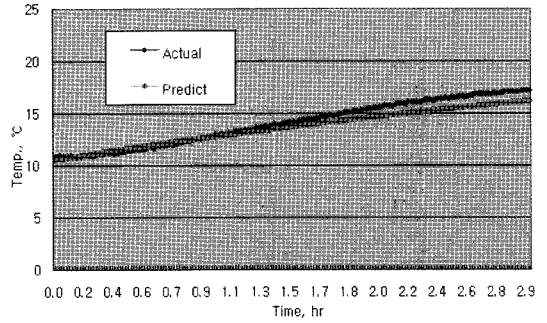


Fig. 11. Comparison actual model to predict model (Rice hulls-without mulching-air temperature of 15°C-middle).

도차가 심하며, 기온이 높을수록 온도차가 적게 나타났다.

Fig. 10은 왕겨 배지의 멀칭을 하지 않고 외기는 15°C 일 때의 위치별 온도상수를 나타낸 것으로서, 그림의 회귀방정식으로부터 위치별 온도상수 a, b값을

Table 1. Newton equation constants of media type according to the depth in the plant at air temperature 5, 10, 15°C.

Air Temp.	Classification		Top		Middle		Bottom	
	Mulching	Media	a	b	a	b	a	b
5°C	Without mulching	Rice hulls	-0.2582	0.0311	-0.1152	0.0003	-0.0370	0.0201
		Pearlite	-0.1181	0.0127	-0.0756	0.0187	-0.0171	0.0186
		Rice hulls + Peatmoss	-0.1184	-0.0338	-0.0853	-0.0868	-0.0160	-0.0293
		Pearlite + Peatmoss	-0.1802	0.0236	-0.0639	0.0289	-0.0099	0.0143
	With mulching	Rice hulls	-0.1458	-0.1088	-0.1057	-0.0151	-0.0403	0.0189
		Pearlite	-0.1548	0.0052	-0.0762	0.0136	-0.0198	0.0177
		Rice hulls + Peatmoss	-0.1086	-0.0313	-0.1047	-0.0473	-0.0311	0.0233
		Pearlite + Peatmoss	-0.1653	0.0733	-0.0641	0.0390	-0.0150	0.0165
10°C	Without mulching	Rice hulls	-0.4794	0.1334	-0.1393	-0.0008	-0.0304	-0.0111
		Pearlite	-0.4124	0.2144	-0.1266	0.0200	-0.0228	0.0188
		Rice hulls + Peatmoss	-0.2820	0.1370	-0.1532	-0.0100	-0.0330	0.0350
		Pearlite + Peatmoss	-0.2630	0.0694	-0.0739	0.0181	-0.0098	0.0179
	With mulching	Rice hulls	-0.0860	-0.1337	-0.0724	-0.0140	-0.0357	0.0089
		Pearlite	-0.2167	0.0798	-0.1103	0.0321	-0.0343	0.0192
		Rice hulls + Peatmoss	-0.3340	0.1990	-0.3404	0.1808	-0.1033	0.0706
		Pearlite + Peatmoss	-0.2789	0.1330	-0.0879	0.0289	-0.0306	0.0116
15°C	Without mulching	Rice hulls	-0.9839	0.1466	-0.3732	0.0671	-0.0604	0.0529
		Pearlite	-0.5006	0.2151	-0.2332	0.0927	-0.0419	0.0023
		Rice hulls + Peatmoss	-0.6818	0.1906	-0.5877	0.1806	-0.0897	0.1159
		Pearlite + Peatmoss	-0.6181	0.1215	-0.3215	0.3160	-0.0450	0.0758
	With mulching	Rice hulls	-0.7316	0.3499	-0.3977	0.2389	-0.0805	0.0531
		Pearlite	-0.3887	0.1968	-0.2378	0.1691	-0.0478	0.0735
		Rice hulls + Peatmoss	-0.6729	0.2581	-0.6452	0.2641	-0.0833	0.0182
		Pearlite + Peatmoss	-0.6930	0.1726	-0.2479	0.2376	-0.0615	0.0581

결정하였으며, 4가지 배지에 대하여 처리기온별, 멀칭 유무별로 배지 깊이(상중하)에 따른 상수 a, b를 구하면 Table 1과 같다.

Table 1의 모델과 온실내 기온 변화패턴을 이용하여 Fig. 11에서와 같이 기온을 시작한 후 배지온 실측치와 예측치를 비교하였다. 그림은 온실내 기온 15°C에서 멀칭을 하지 않은 왕겨배지의 중간지점의 결과로서 최대 1.2°C의 적은 온도차가 나타나 예측모델로 이용 가능한 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 딸기의 수경재배에서 전열선이 삽입된 온수관을 이용하여 배지의 지하부 온도를 관리할 수 있는 가온시스템을 개발하고, 가온튜브내 물의 온도가 25°C 일 때 배지 4종류(왕겨, 펄라이트, 왕겨80% + 피트모스20%, 펄라이트80% + 피트모스20%), 멀칭 2종류(멀칭무, 멀칭)의 처리구별로 온실기온 3수준(5, 10, 15°C)에 따른 배지 내 온도의 변화를 측정하였다. 그 결과로 다선식 가온튜브의 제어성능은 3선식이 설정온도 도달성이 30분이며 제어된 온도폭 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로서 가장 좋은 것으로 나타났다. 배지의 종류별로는 펄라이트 80%의 배지보다 왕겨 80%의 배지가, 멀칭 유무별로는 멀칭한 경우에서 배지온도가 안정되는 시간이 180분으로 빠르게 나타났다. 왕겨 배지, 멀칭, 온실내 기온 5°C 일 경우 배지온 모델에서 온도상수 a는 -0.1458, b는 -0.1088로 나타났으며, 개발된 모델을 이용할 경우 저온기에서 온실내 기온에 따라 배지내 온도상승을 예측할 수 있다.

주제어 : 가온, 다선식 전열튜브, 배지온도, 베드, 수경재배

사 사

본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원으로 수행되었음.

인 용 문 헌

1. Chang, J.T., J.I. Son, K.C. Kang, B.G. You, Y.S. Chang, and J.W. Lee. 1997. Experimental study on soil heating effects for the improvement of root environment. Proceeding of Bio.Env. Control. 6(1):112-115 (in Korean).
2. Holman, J.P. 2002. Heat Transfer Ninth Edition. McGraw.Hill, Inc., New York, USA.
3. Jang, B.C., Y.P. Hong, and J.C. Chun. 1992. Effect of root zone temperature in hydroponics on plant growth and nutrient uptake in vegetable crops. J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert. 25:242-248 (in Korean).
4. Jun, H.J., J.G. Hwang, M.J. Son, and D.J. Choi. 2008. Effect of root zone temperature on root and shoot growth of strawberry. J. Bio-Env. Con. 17:14-19 (in Korean).
5. Park, C.W. 2005. A heating apparatus consisting of heating pipe and the heat method using it. Korean Patent Publication number 10-0670394 (in Korean).
6. Udagawa, Y., T. Ito, and K. Gomi. 1991. Effects of root temperature on the absorption of water and mineral nutrients by strawberry plants 'Reiko' grown hydroponically. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 59:711-717 (in Japanese).