

양액냉각시스템의 배관 배치 최적화를 위한 수치해석 연구

Numerical analysis for optimal pipe arrangement in nutrient solution cooling system

김문기 · 김기성 · 한진희 · 심상원

서울대학교 생물자원공학부

Kim, M.K. · Kim, K.S. · Han, J.H. · Sim, S.W.

Dept. of Agricultural Eng., Seoul National university, Suwon 441-744

서론

최근 시설원예에서 많이 도입되고 있는 양액재배의 경우 여름철 고온으로 인해 양액 온도가 상승하고 그로 인해 양액중 용존산소량이 저하되어 작물생육에 저해를 가져오며 동시에 병원균에 대한 저항정도가 저하하므로 양액냉각법에 의한 생육 촉진효과가 크고 과채류나 엽채류모두 25℃를 고액온 한계온도로 하여 냉각을 하는 것이 좋은 것으로 보고되었다(橋, 1986 : 古田, 1987). 또한, 30℃의 양액을 24℃로 냉각해 준 경우 최대 1.5℃의 작물체온 강하효과가 있는 것으로 보고되고 있다(남 등, 1992).

수경재배의 경우 베드가 설치되어있고 다량의 배양액이 순환되고 있으므로 일반 온실과는 전열특성이 매우 다르며 냉각 시스템과 배관 및 양액탱크 등이 추가되므로 새로운 모델의 개발이 요망된다(남, 1994). 이를 위해 수경온실의 양액냉각부하 산정을 위한 수치 모델을 개발하고 양액냉각부하를 산정하여 효율적인 양액냉각시스템을 개발하고, 연구를 통해 적절한 냉각시스템의 구축에 수치모델개발이 필요함을 입증하였다(남 등, 1993). 그러나 수치모델을 개발하는데 있어서 Schwartz(1972)은 일반적으로 채소의 지상부와 뿌리의 최적생장을 위한 지하부 생육적온은 15~25℃가 적합하며 25℃이상에서는 생리장해가 나타나기 쉽고 심(1999)은 배양액의 수온을 15, 20, 25, 30℃조절하여 상추재배 시험을 한 결과 20℃에서 생육이 가장 좋았고 30℃에서 가장 낮은 생육을 나타냈다고 보고하였다. 이상의 보고에서 베드내에서도 온도편차가 발생할 수 있고 이로 인해 생육장해가 발생할 수 있음을 유추할 수 있다. 따라서 베드내 온도분포를 고려하여 베드 전체에 대한 열량을 균일하게 전달할 수 있는 시스템 개발이 요망된다.

본 연구에서는 베드내 양액냉각시스템의 전열특성을 고려한 열전달 모델의 수치해석을 통하여 베드내 튜브배치를 최적화하기 위한 기본 설계자료를 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험장치 및 방법

실험은 2002년 10월 28일부터 11월 17일까지 수행하였으며 실험에 사용된 양액냉각시스템의 제원은 가로 40 cm, 세로 100 cm, 높이 140 cm이다. 베드의 제원은 가로 106 cm, 세로 50 cm, 높이 8cm, 두께 2.8 cm이고 측정 개수는 총 15개로 하였다. 양액의

농도에 따른 열용량의 차이는 무시할 수 있으므로(남, 1992) 베드내에는 양액 대신 물을 베드바닥에서 7 cm까지 채워서 실험하였고 사용된 냉각튜브는 나일론(N-Tube)재질이며 외경 10 mm, 내경 8mm였다. 본 실험에 사용된 계측장치는 베드내 물의 온도와 베드로 지하수가 유입되는 곳, 베드 밖으로 유출되는 곳, 베드 외부 온도를 측정하기 위해 T형 열전대를 사용하였으며 측정된 데이터는 (DC 100, YOKOGAWA)를 이용하여 15초 간격으로 저장하였다. 실험은 튜브배치와 지하수 온도, 베드내 물의 온도를 4가지로 나누어 시행하였으며 그 결과는 Table 1 과 같다.

Table. 1. Schematic plan of the experiment

Variable	1	2	3	4
Temperature of groundwater (°C)	19.2	15.7	15.8	15.8
Temperature of water in bed (°C)	34	25.6	28.9	28.2

유속 : 23.5 l/s

2. 수치모델의 구성

1) 지하수, 베드내 물의 열 교환량

$$Q = m_w c_w (\theta_2 - \theta_1)$$

여기서, Q는 열교환량(kJ/s), m_w 는 물의 질량유량(kg/s), c_w 는 물의 비열(kJ/kg°C), θ_1, θ_2 는 파이프내 입구와 출구 온도차이다.

2) 총합열전달계수

$$U = \frac{Q}{A * MTD}$$

여기서, Q는 열교환량(kJ/s), U는 총합열전달계수(kJ/m²°C), A는 열교환면적(m²), MTD는 대수평균온도차이다.

$$LMTD = \frac{(\theta_{n+1} - \theta_2) - (\theta_n - \theta_1)}{\ln \frac{\theta_n - \theta_1}{\theta_{n+1} - \theta_2}}$$

여기서, θ_n, θ_{n+1} 은 온도변화 전,후의 양액온도, θ_1, θ_2 는 지하수의 입,출구온도이다.

3) 복사에 의한 열교환량

$$Q = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$$

여기서, ϵ 는 방사율(emissivity), σ 는 Stefan-Boltzmann상수(5.569*10⁻⁸W/m²K⁴), A는 표면적, T_1, T_2 는 각각 외부 기온과 양액의 온도이다.

결과 및 고찰

1. 모델의 검증

모델의 검증은 지하수 온도와 베드내 물 온도에 따른 네 가지 조건의 실험에서 얻은 실험값에 의해 검증되었다. 모델에서 구성된 12개의 섹터중 실험에서의 베드내 센서위치와 부합되는 1, 4, 7, 10번 섹터를 적용하였다. 결정계수 R^2 의 값이 0.957~0.987의 범위를 보였으며 결정계수의 값이 모두 1에 가까운 값을 나타내므로 수치해석에 의한 예측값과 실험값이 비교적 잘 일치하였다. Fig. 1은 Table 1에 나와있는 실험 1번(지하수 온도 19.2℃, 베드내 물 온도 34℃)에서 수치해석에 의해 계산된 섹터별 예측값과 실험값을 함께 도시한 것이다.

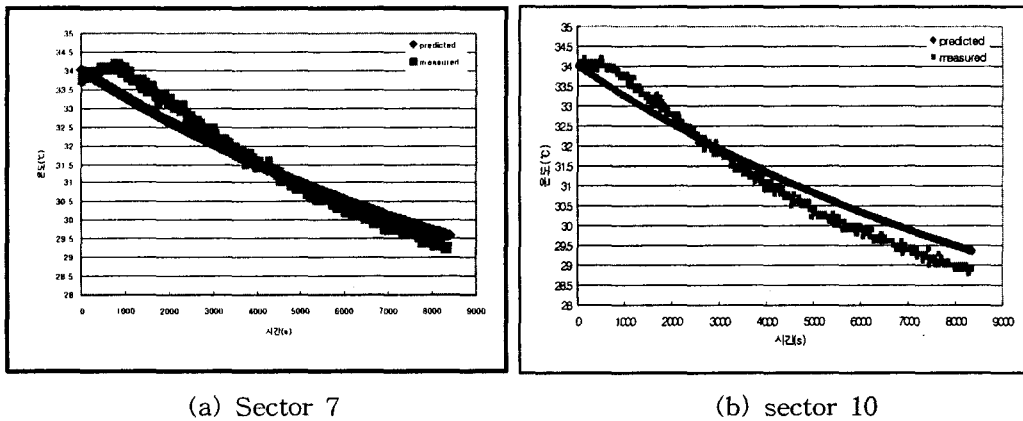


Fig. 1. Comparison of temperature between measure and predicted data

2. 모델의 적용

1) 조건 변화에 따른 베드내 파이프 최적배치

외기온 41℃, 베드내 물의 온도 30℃, 지하수 15℃, 유속은 0.4675m/s 파이프 외경은 0.01m를 기준으로 한 변수를 달리하고 나머지 변수는 고정시켜서 결과를 도출하였다.

2) 지하수 투입시간에 따른 베드내 파이프 최적배치

지하수를 흘려주는 시간을 60분, 120분으로 변화시켜 모의하였다. 구간별 단위 간격당 소요되는 파이프의 길이는 120분일 경우 최대 5.86m/sector, 60분일 경우 10.73m/sector로 유수시간이 감소할수록 증가하였다. 또한 60분, 120분의 경우 모두 초기 유입구로부터 거리가 멀어질수록 증가하는 경향을 보였다.

3) 유속에 따른 베드내 파이프 배치

유속을 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0m/s로 변화시켜 구간별 간격과 소요 파이프길이를 계산하였다. 구간 단위 간격당 소요파이프의 길이는 각각 20.47, 13.76, 12.21, 11, 10.48, 9.4m로 감소함을 보였다. 세밀히 구간을 나누었을때 각 구간별 유입구, 유출구의 온도차를 줄일수 있음을 보여주고 있다. 또한 유속이 빠를수록 베드내 구간 간격이 일정해짐을 보였다.

4) 환경에 따른 베드내 파이프 배치

환경을 0.01m, 0.015m, 0.02m로 계산하여 도식화한 것이다. 유속의 경우처럼 환경이 클수록 베드내 필요한 구간수가 줄어들고 단위 구간당 소요되는 파이프의 길이와 구간별 간격은 커짐을 알 수 있다. 다른 변수들을 변화시켰을 때와는 달리 구간이 바뀔 때 따라 파이프의 길이와 간격이 거의 일정함을 보였다.

5) 베드 외부온도, 지하수 온도 변화에 따른 베드내 파이프 배치

베드 외부온도를 41°C, 45°C로 변화시켜 모의하였다. 41°C의 경우 파이프의 길이는 최대 0.408m~0.416m, 구간별 간격은 0.0358m~0.046m, 45°C의 경우 파이프의 길이는 0.406m~0.413m, 구간별 간격은 0.0356m~0.043m, 값을 보였다. 외부온도가 높을수록 구간별 간격은 조밀하고 구간별 단위 간격당 소요되는 파이프의 길이 또한 큼을 알 수 있다. 또한 초기 유입구로부터 멀어질수록 단위 구간별 간격당 소요되는 파이프의 길이도 증가추세를 보였다.

요약 및 결론

수치모델을 통해 지하수 투입시간, 유속, 환경, 베드외부온도, 지하수온도의 5가지 변수들을 변화시키면서 그 특성을 분석하였고 그 결과는 다음과 같다.

1. 지하수 투입시간을 60분, 120분으로 변화시켜 목표온도까지 베드내 수온을 떨어뜨리기 위한 시뮬레이션을 한 결과 지하수를 흘려주는 시간이 짧을수록 구간당 소요되는 파이프의 길이는 증가함을 보였다.
2. 유속을 증가시키면 베드내 구간 수를 줄일 수 있고 이를 통해 소요되는 파이프의 길이를 최적화 할 수 있어서 경제적인 설계를 할 수 있는 이점이 있다.
3. 환경이 커질수록 지하수의 흐름량이 많아지기 때문에 베드내 물의 온도를 더 빨리 떨어뜨릴 수 있고 각 구간별 소요간격과 파이프길이가 일정하기 때문에 환경만을 변화시킴으로서도 전체적인 냉각시스템의 설계조건들을 손쉽게 산정할 수 있다.
4. 외부온도와 지하수 온도변화는 유사한 경향을 보였다. 지하수 온도의 경우 그 온도변화가 심하지 않으나 외부온도의 경우 여름철 시설내 냉방을 할 경우 온도에 변화가 있을 수 있으므로 냉각시스템 설계 자료로 유용하다고 판단된다.

인용문헌

1. Holman, J.P. 1990. Heat Transfer. McGraw-Hill Publishing Company.
2. Steven C. Chapra, Raymond P. Candle. 1994. Numerical Methods For Engineers. McGraw-Hill Publishing Company.
3. 橋昌司.1986. 養液栽培における環境要因と根の機能. 農業および園藝 61:223-228.
4. 吉田裕, 大井美知男, 藤木幸至. 1987. NFTにおける培養液冷却の効果. 農業および園藝. 62(5):650-652.
5. 남상운, 김문기, 손정익. 1992. 수경재배 시스템의 전열특성 및 양액냉각이 작물체온에 미치는 효과. 서울대농학연구지 17(2):97-104
6. 남상운, 손정익, 김문기. 1993. 지하수를 이용한 양액냉각시스템 개발에 관한 기초연구. 생물생산시설환경 2(1):1-8
7. 심미영. 1999. 상추 수경재배에서 근권부 환경제어가 상추생육 및 품질에 미치는 영향. 서울시립대학교석사학위논문.