

# 지중 냉각 시스템의 열전달 특성과 냉각부하

## Heat Transfer Characteristics and Cooling Load of a Soil Cooling System in Greenhouse Root Zone

남 상 운

충남대학교 농업생명과학대학 농업공학부

Nam, Sang-Woon

Division of Agricultural Eng., Chungnam National Univ., Daejeon, 305-764

### 서 론

대부분의 작물이 생육하기에 적합한 지온은 18~20℃ 정도이고 최고한계는 23~25℃로 알려져 있으나, 여름철 온실내의 지온은 이보다 높으며 2001년 8월에 온실내의 지온을 계측해본 결과 표층으로부터 5~35cm 깊이의 평균 지온은 27~29.4℃까지 상승하는 것으로 나타났다(김 등, 2001). 따라서 지중 냉각의 필요성이 인정되며, 정 등(1998)의 보고에 의하면 무처리시 지온 25.7℃에 대하여 지하수 냉각으로 지온을 19~19.6℃로 냉각해줄 경우 배추 수량이 8~11% 증수되었다.

지중냉각시스템에 관한 보고는 많지 않으나 한 예를 살펴보면, 5~7℃로 냉각된 물을 지중에 매설된 파이프를 공급시 평균 지온을 15~17℃로 유지 할 수 있었으며, 지하수로 냉각시 3.3℃정도 지온이 강하하는 것으로 나타났다(Rynk, 1985). 그러나 유량은 보고되지 않아 알 수 없으며, 파이프의 재질은 PVC, 매설깊이는 10~40cm, 매설간격은 15~40cm, 표면은 폴리스틸렌 멀칭으로 되어 있었다.

한편, 근권부 양액의 냉각은 뿌리의 활력을 좋게하여 작물의 생육을 크게 개선하는 효과를 보이는 것으로 보고되고 있으며(Matsuoka, 1992), 또한 여름철 지상부의 막대한 냉방부하에 비하여 근권부의 냉각부하는 비교적 작으므로 경제적인 고온극복 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 지중 냉각시스템의 기술을 체계화하고 설계자료를 제공할 목적으로 실험을 통하여 지중 냉각시스템의 열전달 특성을 분석하고, 냉각부하를 산정하였다.

## 재료 및 방법

Fig. 1은 지중 냉각시스템의 열전달 실험 모식도이다. 외경 27.2mm, 두께 3mm, 길이 6m인 스테인레스 파이프를 지중 20cm의 깊이에 매설하고, 지하수를 흘리면서 지중냉각 실험을 수행하였다. 그림에서와 같이 토양층에 격자망을 구성하여 열전대로 온도를 계측하고, 파이프 상, 하, 수평 방향의 열류 및 토양수분을 열류판과 텐시오미터로 각각 계측하였다. 또한 지하수 유량과 수온, 지표 및 지중온도, 온실 내의 기온, 일사량, 풍속 등을 동시에 계측하였다. 실험은 2001년 7~8월중에 플라스틱 온실에서 실시하였다.

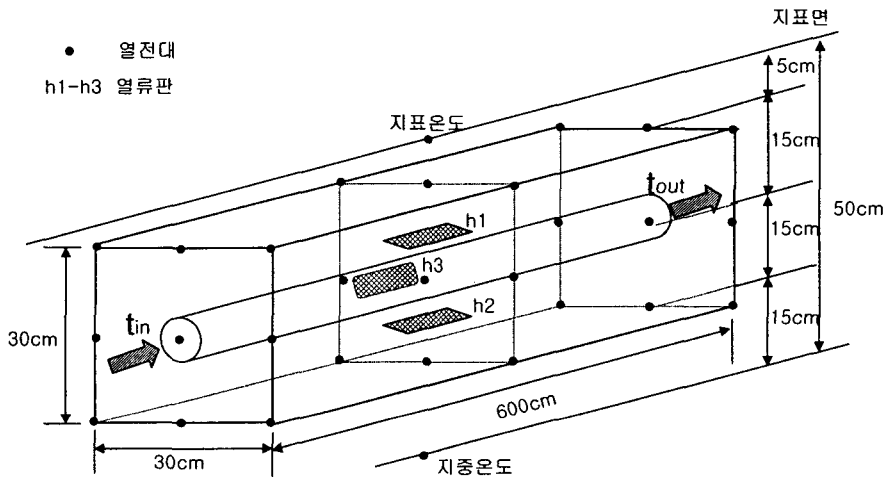


Fig. 1. Schematic of experiment on the soil cooling system.

## 결과 및 고찰

실험 온실 토양의 토성은 국제토양학회법에 의해 사양토(SL)로 분류되었으며, 실험 기간 동안의 지면 50cm 높이의 실내풍속은 0.1~0.4 m/s의 범위로 나타났다. 토양의 함수비는 18.7~36%의 범위에서 변화하였으며, 함수비에 따른 지중열류는 Fig. 2와 같이 나타났다. 함수비가 증가함에 따라 열전도율이 커지기 때문에 열류도 증가하지만, 적정 함수비 범위에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 지표에서의 일사 흡수 및 냉각파이프와 지온의 차이가 큰 파이프 상부의 수직 열류가 가장 커서 40~120  $W \cdot m^{-2}$ 의 범위를 보였고, 하부는 약 3%, 수평 방향은 10% 정도로 작게 나타났다.

Fig. 3은 일사량에 따른 지표온도의 상승을 실내온도와의 차이로 나타낸 것이다. 일사량의 증가에 따라 지표온도는 거의 직선적으로 상승하는 것으로 나타났다. 이것은 온실의 열환경을 시뮬레이션할 때 지표면에서의 대류열전달을 구하는데 유의한 자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

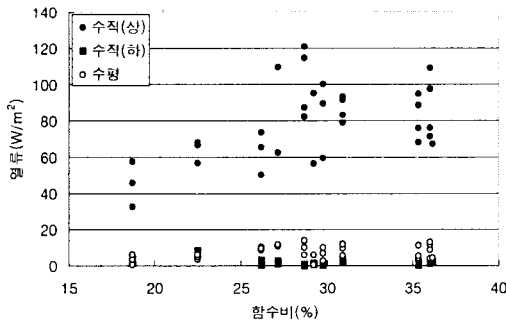


Fig. 2. Heat flux with soil water content.

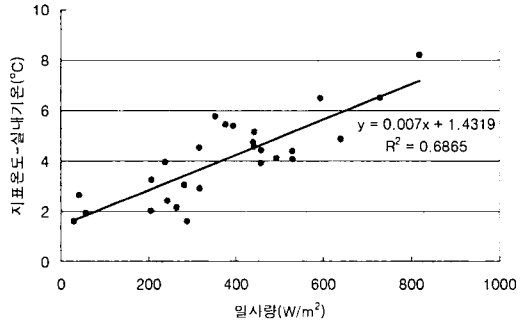


Fig. 3. Temperature difference between soil surface and indoor air with solar radiation.

Fig. 4는 지하수 유량에 따른 지중냉각 열량을 나타낸 것으로서 유량이 증가함에 따라 지중냉각 열량도 증가하지만 그 증가율은 감소하는 것으로 나타났다. 실험기간동안 냉각파이프 입구의 지하수 수온은 18.2~21.4 °C(평균 19.9°C)로 비교적 높았다.

Fig. 5는 냉각열량에 따른 평균 지온의 변화를 나타낸 것이다. 평균 지온은 냉각 파이프의 중심으로부터 15cm 떨어진 격자망의 지온 전체를 평균한 것이다. 무냉각시 평균 지온 27.8°C 정도에서 지하수 유량 30 L/min의 냉각에 의해 평균 지온은 약 25.6°C로 약 2.2°C 정도의 냉각효과가 있었다. 그러나 열원인 지하수의 수온이 비교적 높아서 지온을 25°C이하로 냉각하는 것은 어려웠다.

우리 나라의 여름철 지하수 수온은 대체로 15~18°C 정도이므로 지하수만으로 적정 지온의 범위인 18~20°C까지 냉각하는 것은 불가능하다. 그러나 한계 지온인 23~25°C의 범위로 냉각하는 것은 지하수를 이용하여도 충분한 것으로 판단되므로 경제적인 고온극복 수단으로는 지하수를 이용한 지중냉각시스템이 적당할 것으로 생각된다. 보다 고도의 환경조절을 요구하는 시설의 경우에는 히트펌프 등을 이용하여 10°C 이하로 냉각한 물을 지중냉각시스템에 흘려주어야만 소기의 목적을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

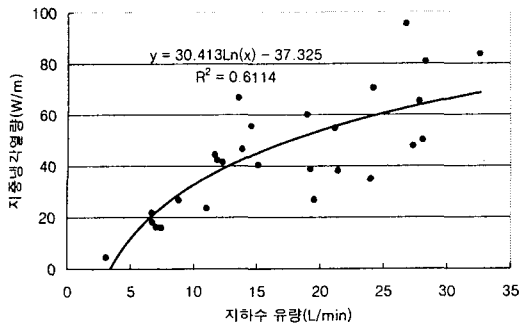


Fig. 4. Soil cooling capacity with the flow rates of ground water.

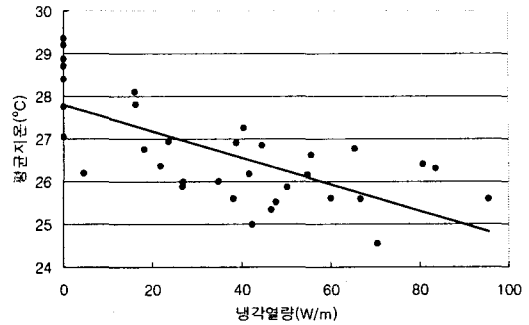


Fig. 5. Mean soil temperature of root zone with cooling capacity.

한편 파이프의 매설 깊이와 간격은 작물의 재식 거리와 뿌리의 분포, 즉 근근역의 범위를 고려하여 결정하고, 파이프의 길이가 너무 길면 냉각수의 수온이 상승하여 후반부의 냉각효과가 떨어지므로 냉각수의 입구와 출구를 분리한 병렬 연결의 파이프라인을 구성하는 것이 바람직할 것이다.

Fig. 6은 실험 결과를 분석하여 단위면적당 지중냉각 부하량을 구한 것이다. 일사량에 따른 지표온도와 기온의 차이(Fig. 3), 지중열류 계측치로부터 구한 함수비에 따른 열전도율, 그리고 지중 목표온도를 입력자료로 하고, 지중 20cm에 매설된 파이프의 상부로부터 토양을 통하여 전달되는 전도열 전달량을 구하여 냉각부하로 하였다.

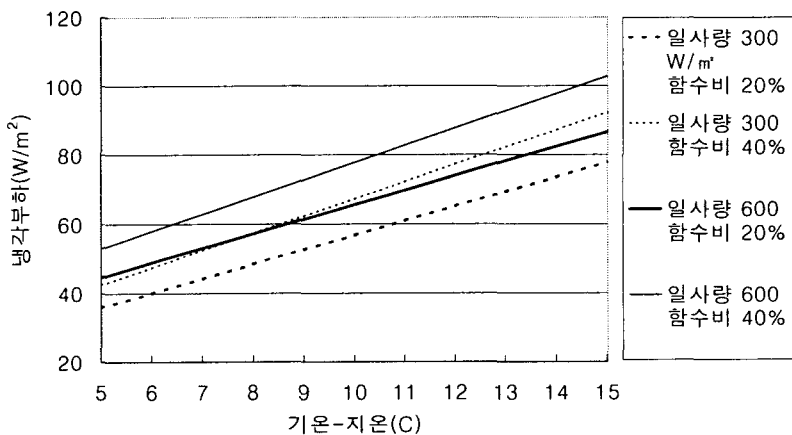


Fig. 6. Cooling loads of a root zone soil cooling system.

차광에 의하여 실내 일사량이  $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 이고 실내온도  $35^\circ\text{C}$ 인 경우 함수비 40% 상태에서 지중의 목표온도를  $25^\circ\text{C}$ 로 하기 위하여는  $67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 의 냉각열량이 필요한 것으로 나타났다.

이(1998)는 지중 냉각시스템의 냉각용량 산정식이 개발되어 있지 않아 지중 가온에 사용하는 필요열량 계산식의 적용을 시도한 바 있으나, 본 연구 결과는 그 보다 3배 이상 큰 것으로 나타났다. 지중가온은 야간에 시행하는 것으로서 태양복사를 고려하지 않기 때문으로 판단된다.

## 요약 및 결론

본 연구에서는 지중 냉각시스템을 경제적인 고온극복 방법중의 하나로 생각하고, 기술을 체계화하기 위한 시도로 지중 냉각시스템의 열전달 특성을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 토양 함수비에 따른 지중 열류, 일사량에 따른 지표온도와 실내온도의 차이, 지하수 유량에 따른 지중 냉각열량의 변화, 냉각열량에 따른 평균지온의 변화와 냉각 효과를 분석하였다. 온실 기온과 지온의 차이, 일사량 및 토양의 함수비에 따른 지중 냉각부하를 구하여 설계자료로 제시하였다. 보다 정확한 설계자료의 구축을 위해서는 다양한 조건별 실험을 추가로 수행해야 할 것으로 사료된다.

## 인용문헌

1. 김문기, 남상운, 김기성. 2001. 온실냉방시스템의 효율적 이용에 관한 연구. 농림부. pp. 204-211.
2. 이기명. 1998. 시설유형별 경제적 생산설비의 구성방안. 시설원예 생산비용 절감기술 세미나. 한국시설원예연구회. pp. 77-105.
3. 정재현, 주선종, 이경희. 1998. 근권냉방에 의한 엽채류 품징향상 시험. 충북진흥원 시험연구보고서. pp. 788-790.
4. Matsuoka, T. and H. Suhardiyanto. 1992. Thermal and flowing aspects of growing petty tomato in cooled NFT solution during summer. Environ. Control in Biol. 30 : 119-125.
5. Rynk, R. and F. Green. 1985. Greenhouse root zone soil cooling. ASAE paper No. 85-4532.