

Estimation of Soil Cooling Load in the Root Zone of Greenhouses¹⁾

Nam, Sang-Woon

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

Abstract

Root zone cooling, such as soil or nutrient solution cooling, is less expensive than air cooling in the whole greenhouse and is effective in promoting root activity, improving water absorption rate, decreasing plant temperature, and reducing high temperature stress. The heat transfer of a soil cooling system in a plastic greenhouse was analyzed to estimate cooling loads. The thermal conductivity of soil, calculated by measured heat fluxes in the soil, showed the positive correlation with the soil water content. It ranged from 0.83 to 0.96 $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ at 19 to 36% of soil water contents. As the indoor solar radiation increased, the temperature difference between soil surface and indoor air linearly increased. At 300 to 800 $W \cdot m^{-2}$ of indoor solar radiations, the soil surface temperature rose from 3.5 to 7.0 $^\circ C$ in bare ground and 1.0 to 2.5 $^\circ C$ under the canopy. Cooling loads in the root zone soil were estimated with solar radiation, soil water content, and temperature difference between air and soil. At 300 to 600 $W \cdot m^{-2}$ of indoor solar radiations and 20 to 40% of soil water contents, 46 to 59 $W \cdot m^{-2}$ of soil cooling loads are required to maintain the temperature difference of 10 $^\circ C$ between indoor air and root zone soil.

Key words: greenhouse, soil cooling system, cooling load, root zone, soil temperature

¹⁾이 논문은 2000년도 농림부에서 시행한 농림기술개발과제의 일부로 수행되었음.

서 론

대부분의 작물이 생육하기에 적합한 지온은 18~20 $^\circ C$ 정도이고 최고한계는 23~25 $^\circ C$ 로 알려져 있으나, 여름철 온실내의 지온은 이보다 높으며 2001년 8월에 온실내의 지온을 측정해 본 결과 표층으로부터 5~35 cm 깊이의 평균 지온은 27~29.4 $^\circ C$ 까지 상승하는 것으로 나타났다(Kim et al., 2001). 또한 Chung et al. (1998)의 보고에 의하면 무척리시 지온 25.7 $^\circ C$ 에 대하여 지하수를 이용하여 지온을 19~19.6 $^\circ C$ 로 냉각해줄 경우 배추 수량이 8~11% 증수되었다. 따라서 지중냉각의 필요성이 인정된다.

지중냉각시스템에 관한 보고는 많지 않으나 한 예를 살펴보면, 5~7 $^\circ C$ 로 냉각된 물을 지중에 매설된 파이프 로 공급시 평균 지온을 17~18 $^\circ C$ 로 유지할 수 있었으며(Ball, 1984; Rynk, 1985), 13.5~15 $^\circ C$ 의 지하수로 냉각시 평균 3.3 $^\circ C$ 정도 지온을 강하시킬 수 있는 것으로 나타났다(Wiel, 1984). 그러나 유량과 파이프라인 시스템 등은 상세히 보고되지 않아 알 수 없으며, 파이프의 재질은 PVC, 매설깊이는 10~40 cm, 매설간격은

15~40 cm, 표면은 폴리스틸렌 멀칭으로 되어 있었다.

한편, 양액재배시 근권부의 냉각은 뿌리의 활력을 좋게하여 작물의 생육을 크게 개선하는 효과를 보이는 것으로 보고되고 있으며(Matsuoka, 1992; Lee et al., 1999), 또한 여름철 지상부의 막대한 냉방부하에 비하여 근권부의 냉각부하는 비교적 작으므로 경제적이고 온극복 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

위에 보고된 지중냉각은 환경조건에 따른 식물의 반응을 연구하기 위하여 시도된 것으로서 정확한 시스템의 제원을 알 수 없으며, 실제 농가에서 고온극복의 수단으로 지중냉각 시스템을 이용하고 있는 사례는 많지 않다. 지중냉각은 농가에서 비교적 많이 사용하고 있는 지중가온 시스템의 경우와 열전달 메카니즘이 유사하지만 지중가온 과정에서 나타나기 쉬운 토양의 건조현상이 없으므로 효율은 좀 더 좋은 편이다. 또한 지중냉각의 기본적인 시스템은 이미 개발되어 사용되고 있는 지중가온 시스템과 동일하다. 그러나 지중가온은 주로 일사가 없는 야간에 이루어지는데 반하여 지중냉각은 일사가 강한 여름철의 주간에 실시되므로 열부하는 큰 차이를 보이게 될 것이다. 따라서 본 연구

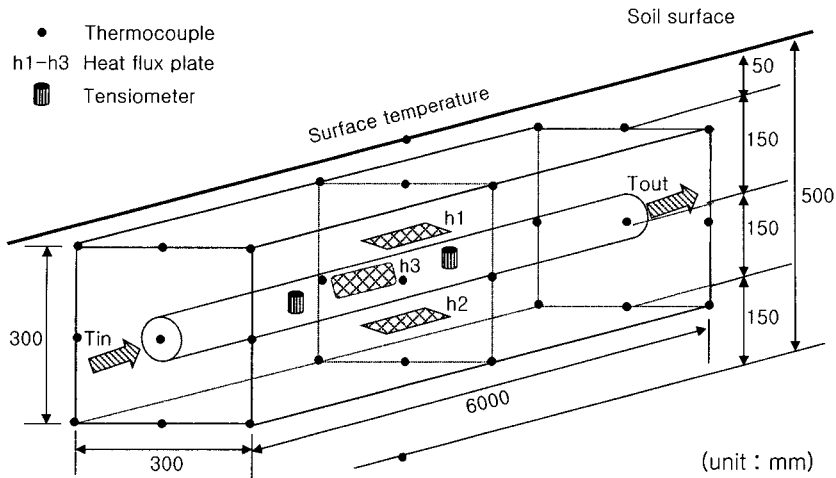


Fig. 1. Schematic diagram of an experimental soil cooling system.

에서는 지중 냉각시스템의 기술을 체계화하고 설계자료를 제공할 목적으로 실험을 통하여 지중 냉각시스템의 열전달 특성을 분석하고, 환경조건별로 냉각부하를 산정하였다.

재료 및 방법

Fig. 1은 지중 냉각시스템의 열전달 실험 모식도이다. 외경 27.2 mm, 두께 3 mm, 길이 6 m인 스테인레스 파이프를 지중 20 cm의 깊이에 매설하고, 지하수를 흘리면서 지중냉각 실험을 수행하였다. 그림에서와 같이 토양층에 격자망을 구성하여 열전대(T형, 0.3 mm)로 온도를 계측하고, 냉각파이프 상하 연직 및 수평 방향의 열류를 열류판(MP-75-D, EKO)으로 계측하였다. 토양수분을 텐시오미터(DIK-3150, Daiki)로 측정하고, 수분장력(pF)은 동일한 토양샘플로부터 실내실험을 통하여 함수비(%)로 변환하였다. 또한 지하수 유량과 수온, 지표 및 지중온도(50 cm 깊이), 온실 내의 기온, 일사량, 풍속 등을 동시에 계측하였다. 실험은 2001년(작물이 없는 상태)과 2002년(공시작물 호박) 7~8월중에 충남대학교 부속농장에 설치된 단동 플라스틱 온실(6 m × 18 m)에서 실시하였다.

토양 함수비에 따른 지중 열류와 토양의 열전도율, 일사량에 따른 지표온도와 실내온도의 차이, 지하수 유량에 따른 지중 냉각열량의 변화, 냉각열량에 따른 평균지온의 변화와 냉각 효과를 분석하였다. 실험결과를

기초로 온실 기온과 설정 지온의 차이, 실내 일사량 및 토양의 함수비에 따른 지중 냉각부하를 구하였다. 지중에 매설된 냉각파이프를 통하여 제거해야할 열량은 거의 대부분 지표로부터 냉각파이프 상단으로 유입되는 지중열류이므로 다음 식과 같이 된다.

$$q = k \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

여기서, q 는 단위상면적당 지중냉각부하($W \cdot m^{-2}$), k 는 토양의 열전도율($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)로 함수비에 따라 변하며 실험자료를 이용하였다. L 은 냉각파이프의 매설 깊이(m)이고 ΔT 는 지표온도와 설정지온의 차이로 다음과 같이 구한다.

$$\Delta T = T_a - T_g + \Delta T_{ss} \quad (2)$$

여기서, T_a 는 설계기온($^\circ C$), T_g 는 냉각설정지온($^\circ C$)이고, ΔT_{ss} 는 식 (3)과 같은 지표온도(T_s)와 기온의 차이로서 일사량에 따른 지온상승을 고려한 것이며, 실험결과로부터 작물의 유무에 따른 회귀식을 유도하여 사용하였다.

$$\Delta T_{ss} = T_s - T_a \quad (3)$$

결과 및 고찰

실험 온실 토양의 토성은 국제토양학회법에 의해 사양토(SL)로 분류되었으며, 실험기간 동안의 지면 50

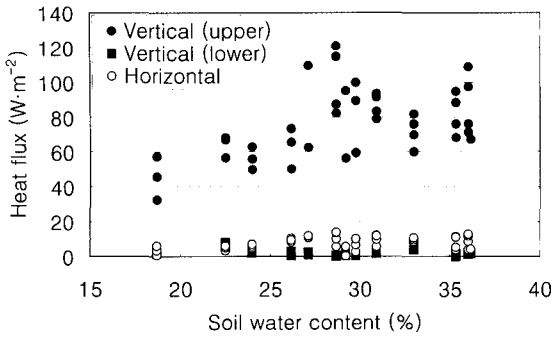


Fig. 2. Horizontal and vertical heat fluxes in the soil as affected by the soil water content.

cm 높이의 실내풍속은 $0.1\sim 0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 범위로 나타났다. 토양의 함수비는 18.7~36.2%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 $40\sim 120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 의 범위를 보였고, 하부는 약 3%, 수평 방향은 10% 정도로 작게 나타났다.

Fig. 3은 토양의 함수비에 따른 열전도율의 변화를 나타낸 것으로서 회귀식을 구하면 다음과 같다.

$$k = 0.008W_c + 0.674 \quad (4)$$

여기서, W_c 는 토양의 함수비(%)이다. 회귀식의 R^2 값은 0.485로 비교적 낮지만, F검정 결과 1%의 유의 수준에서 유의성이 인정되었다. 사양토의 열전도율은 건조 상태에서 0.19, 물로 포화된 상태에서 $1.34\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$.

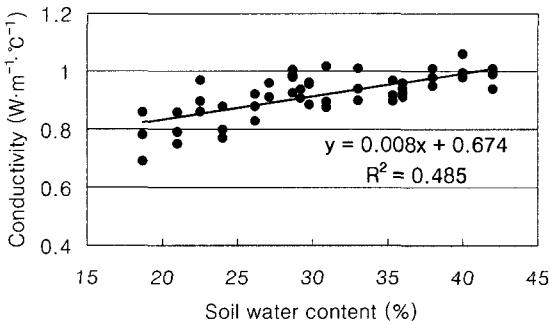


Fig. 3. Thermal conductivity as a function of the soil water content.

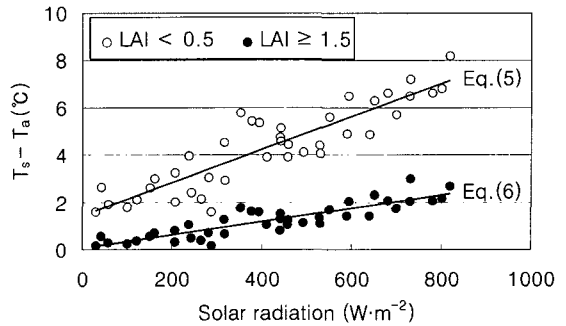


Fig. 4. Temperature difference between soil surface (T_s) and indoor air (T_a) as a function of the indoor solar radiation.

$\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ 로 보고된 것과 비교할 때 대체로 신뢰성이 있는 결과로 판단된다(Cho et al., 1999).

Fig. 4는 일사량에 따른 지표온도의 상승을 실내온도와와의 차이로 나타낸 것이다. 일사량의 증가에 따라 지표온도는 거의 직선적으로 상승하는 것으로 나타났으며, 지표층의 피복상태에 따라 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 지표온도의 상승을 작물이 거의 없는 상태($\text{LAI}<0.5$)와 작물이 지표면을 거의 덮고 있는 상태($\text{LAI}\geq 1.5$)로 구분하여 일사량을 독립변수로 회귀식을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta T_{ss} = 0.007SR + 1.432 \quad (\text{LAI}<0.5) \quad (5)$$

$$\Delta T_{ss} = 0.003SR + 0.064 \quad (\text{LAI}\geq 1.5) \quad (6)$$

여기서, SR 은 실내 일사량($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)이다. 두 식의 R^2 값은 각각 0.798, 0.769였고, F검정 결과 유의성이 높게 나타났다. 이것은 온실의 열환경을 시뮬레이션할 때 지표면에서의 대류열전달을 구하는데 유익한 자료가 될 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서는 지중냉각시스템의 냉각부하를 구하기 위하여 식 (6)을 적용하였다.

Fig. 5는 지하수 유량에 따른 지중냉각 열량을 나타낸 것으로서 유량이 증가함에 따라 지중냉각 열량도 증가하지만, 그 증가율은 감소하는 것으로 나타났다. 실험기간동안 냉각파이프 입구의 지하수 수온은 $18.2\sim 21.4\text{ C}$ (평균 19.9 C)로 비교적 높았다. 온실로부터 수원까지의 거리가 멀고, 기계적인 냉각장치를 사용하지 않았기 때문으로써 지중냉각시스템의 광범위한 열특성을 파악하는 것은 어려웠지만, 냉각하지 않은 경우의 평균 지온이 $27\sim 29.5\text{ C}$ 까지 상승하였으므로 냉각효과

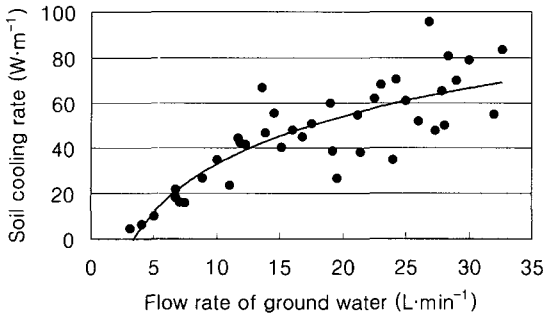


Fig. 5. Soil cooling rate as affected by the flow rate of ground water.

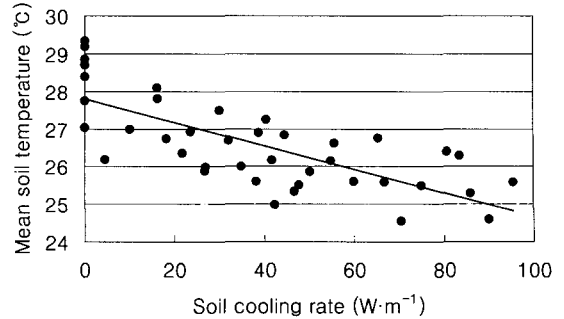


Fig. 6. Mean soil temperature of 12 points in the root zone against the soil cooling rate.

를 분석하는데는 큰 문제가 없는 것으로 판단되었다.

Fig. 6은 냉각열량에 따른 평균 지온의 변화를 나타낸 것이다. 평균 지온은 냉각 파이프의 중심으로부터 15 cm 떨어진 격자망의 상하, 좌우 각 3점씩 전체 12 점의 지온을 평균한 것이다. 무냉각시 평균 지온은 27.8°C 정도였으나 지하수 유량 30 L·min⁻¹의 냉각에 의해 평균 지온은 약 25.6°C로 약 2.2°C 정도의 냉각 효과가 있었다. 그러나 열원인 지하수의 수온이 비교적 높아서 지온을 25°C 이하로 냉각하는 것은 어려웠다.

우리 나라의 여름철 지하수 수온은 대체로 15~18°C 정도이므로 지하수만으로 적정 지온의 범위인 18~20°C 까지 냉각하는 것은 불가능하다. 그러나 한계 지온인 23~25°C의 범위로 냉각하는 것은 지하수를 이용하여도 충분한 것으로 판단되므로 경제적인 고온극복 수단으

로는 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.

한편 파이프의 매설 깊이와 간격은 작물의 재식 거리와 뿌리의 분포, 즉 근구역의 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. 7은 실험 결과를 분석하여 단위면적당 지중냉각 부하량을 구한 것이다. 일사량에 따른 지표온도와 기온의 차이(Fig. 4 및 식 (6)), 지중열류 계측치로부터

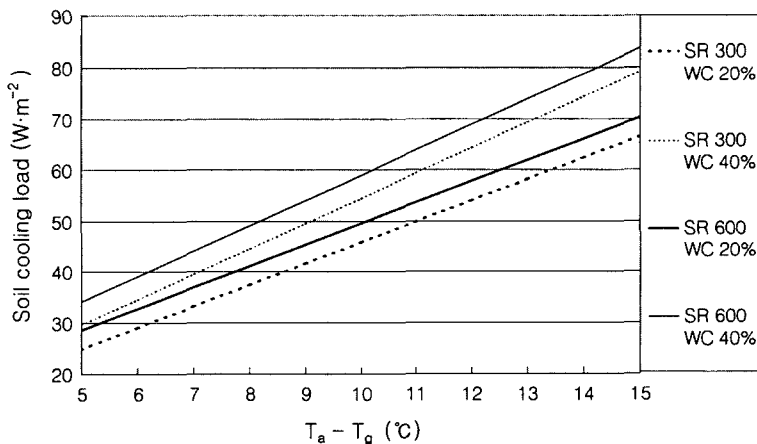


Fig. 7. Cooling loads of a soil cooling system. T_a ; indoor air temperature, T_g ; set soil temperature, SR; indoor solar radiation($W \cdot m^{-2}$), WC; soil water content.

터 구한 함수비에 따른 열전도율(식(4))을 이용하여, 지중 20 cm에 매설된 파이프의 상부로부터 토양을 통하여 전달되는 전도열 전달량(식(1))을 구하여 냉각부하로 하였다. 지중가온 시스템의 난방부하를 구하는 방법과 유사하게 목표로 하는 온실의 설계온도와 냉각설정 지온, 토양의 함수비와 실내일사량을 입력자료로 하여 지중냉각부하를 구할 수 있는 도표를 작성하였다.

차광에 의하여 실내 일사량이 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 이고 실내 온도 35°C 인 경우 함수비 40% 상태에서 지중의 목표 온도를 25°C 로 하기 위하여는 $54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 의 냉각열량이 필요한 것으로 나타났다. Lee(1998)는 지중 냉각시스템의 냉각용량 산정식이 개발되어 있지 않아 지중가온에 사용하는 필요열량 계산식의 적용을 시도한 바 있다. Lee(1998)에 의하면 위와 동일한 조건에서 $17.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 의 냉각열량이 필요한 것으로 보고하여, 본 연구 결과의 $54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 보다 1/3이하로 작게 나타났다. 지중가온은 겨울철 야간에 시행하는 것으로서 태양복사를 고려하지 않고 있는데 반하여 지중냉각은 일사가 강한 여름철 주간에 사용하기 때문에 지중냉각 시스템의 냉각부하 산정에 지중가온 시스템의 난방부하 산정 방법을 그대로 적용하는 것은 적절하지 못한 것으로 판단된다.

본 연구는 제한된 조건하에서 수행된 실험 결과를 이용하여 지중냉각시스템의 냉각부하를 추정해본 것으로서, 보다 정확한 설계자료의 구축을 위해서는 다양한 조건별 실험을 추가로 수행해야 할 것으로 생각된다.

Literature cited

1. Ball, V. 1984. Cornell research concerning the response of alstroemeria to environmental conditions. Grower Talks Magazine, February 1984. p. 14-21.
2. Cho, S.J., C.S. Park and T.I. Eum. 1999. Soil science, 3rd edition. Hyangmunsa Publishing Co. Seoul. p. 50-87 (in Korean).
3. Chung, J.H., S.J. Joo and K.H. Lee. 1998. Experiment on the quality improvement of leaf vegetables by root zone cooling. Chungbuk Agr. Res. & Ext. Service Report. p. 788-790 (in Korean).
4. Kim, M.K., S.W. Nam and K.S. Kim. 2001. Efficient application of greenhouse cooling systems. Ministry of Agriculture and Forestry. p. 204-211 (in Korean).
5. Lee, K.M. 1998. Strategies for setup of economical production facilities in greenhouses. Symposium on the cost saving technology for protected horticulture. The Korean Res. Soc. for Protected Horticulture. p. 77-105 (in Korean).
6. Lee, J.H., O.K. Kwon and Y.H. Park. 1999. Cooling efficiency and growth of tomato as effected by root zone cooling methods in summer season. Proceeding of Bio-Env. Control. 8(2):130-133 (in Korean).
7. 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.
8. Rynk, R. and F. Green. 1985. Greenhouse root zone soil cooling. ASAE paper No. 85-4532.
9. Wiel, A.V.S. 1984. Results of soil cooling with well water. Venlo Experimental Gardens 39(30):38-41.

남 상 운

온실내 근권부의 지중냉각부하 추정

남 상 운

충남대학교 농업생명과학대학 농업공학부

적 요

지중냉각이나 양액냉각과 같은 근권부 냉각은 뿌리의 활력 증진, 양수분 흡수력의 향상, 작물체온의 강하 및 고온스트레스의 감소 등에 효과가 있는 것으로 알려져 있으며, 또한 온실 전체를 냉방하는 것 보다 경제적이다. 따라서 본 연구에서는 지중냉각시스템을 경제적인 고온극복 방법중의 하나로 생각하고, 기술을 체계화하기 위한 시도로 지중냉각시스템의 열전달 특성을 분석하여 냉각부하를 산정하기 위한 실험을 수행하였다. 지중열류 측정자료로부터 함수비에 따른 토양의 열전도율을 분석하였으며, 함수비 19~36%의 범위에서 열전도율은 $0.83\sim 0.96 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ 로 직선적인 증가를 보였다. 일사량, 지표온도 및 기온의 관측치로부터 일사량에 따른 지표온도 상승을 회귀분석한 결과 거의 직선적인 관계를 보였으며, 지표온도는 실내수평면 일사량 $300\sim 800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 의 범위에서 작물이 없는 경우 $3.5\sim 7.0\text{°C}$, 작물이 지표면을 거의 덮고 있는 경우 $1.0\sim 2.5\text{°C}$ 정도 기온보다 상승하는 것으로 나타났다. 실험자료를 이용하여 온실의 설계기온과 냉각설정 기온, 일사량 및 토양의 함수비에 따른 지중냉각시스템의 냉각부하를 구하였다. 실내일사량 $300\sim 600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 토양함수비 20~40%의 범위에서 기온과 지온의 차이를 10°C 로 유지하기 위해서는 $46\sim 59 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 의 냉각열량이 필요한 것으로 나타났다. 보다 정확한 설계자료의 구축을 위해서는 다양한 조건별 실험을 추가로 수행해야 할 것으로 생각된다.

주제어 : 온실, 지중냉각시스템, 냉각부하, 근권부, 지온