

水耕栽培 溫室의 養液冷却시스템 開發

Development of Nutrient Solution Cooling System in Hydroponic Greenhouse

南 相 運* · 金 文 基**
Nam, Sang Woon · Kim, Moon Ki

Summary

Since it is difficult to expect the normal production of plants in greenhouses during hot summer season in Korea, certain provisions on the control of extreme environmental factors in summer should be considered for the year-round cultivation in greenhouses.

This study was carried out to find a method to suppress the temperature rising of nutrient solution by cooling, which is able to contribute to the improvement of the plant growth environment in hydroponic greenhouse during hot summer season.

A mechanical cooling system using the counter flow type with double pipe was developed for cooling the nutrient solution efficiently. Also the heat transfer characteristics of the system was analysed experimentally and theoretically, and compared with the existing cooling systems of nutrient solution. The cooling capacities of three different systems, which used polyethylene tube in solution tank, stainless tube in solution tank, and the counter flow type with double pipe, were evaluated. The performance of each cooling system was about 41%, 70% and 81% of design cooling load in hydroponic greenhouse of 1,000m² on the conditions that the flow rate of ground water was 2m³/hr and the temperature difference between two liquids was 10°C.

According to the results analysed as above, the cooling system was found to have a satisfactory cooling capability for regions where ground water supply is available. For the other regions where ground water supply is restricted, more efficient cooling system should be developed.

* 安城産業大學校 農村開發學科
** 서울大學校 農業生命科學大學

키워드: 水耕栽培, 溫室, 養液冷却시스템, 二重管式
逆對流型 熱交換器, 冷却性能, 地下水冷却

I. 序 論

최근 UR을 대비한 農業構造改善事業의 一環으로 尖端農業施設生産團地 조성사업을 시범사업으로 추진하면서 養液栽培의 보급이 급속도로 늘어나고 있다.⁶⁾ 養液栽培은 土壤栽培에 비하여 生育環境의 制御가 容易하고, 連作障跡를 줄일 수 있으며 周年安定生産에 適合할 뿐만 아니라 無公害식품에 대한 評價 등으로 재배면적이 계속 증가할 것으로 예상되고 있다.^{1,8)}

한편, 우리나라의 기후조건상 여름철 溫室 內部的 環境條件은 作物의 定常生育을 기대하기 어려울 만큼 劣惡하고, 이를 克服하기 위한 技術은 매우 脆弱한 狀態로서 周年栽培의 가장 큰 어려움이라 할 수 있을 것이다. 그런데 養液栽培의 경우 비교적 根圈部 環境의 調節이 容易하므로 적절한 養液冷却를 실시할 경우 高溫克服에 상당한 도움이 될 것으로 생각한다. 실제 水耕栽培의 경우 여름철 고온기의 液溫은 29.5~32.7℃까지 上昇하는것으로 관측되고 있고,^{2,7,10,13,21)} 이것을 25℃이내로 冷却해줄 경우 生育促進效果가 큰것으로 보고되고 있으며,^{16,18,20,22)} 養液冷却의 效果가 根圈部 環境의 改善뿐만 아니라 作物體溫의 降下에도 큰 影響을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다.^{2,5,13)}

地下水에 의한 養液의 冷却效果에 대한 實驗은 이미 실시된 바 있으나, 이들은 傳熱特性에 관한 分析이 없고, 막대한 양의 地下水를 利用해야 하므로 地下水의 賦存量 및 採水可能量 등을 고려할때 농가의 實用溫室規模에서의 適用性 與否는 불투명 하였다.^{7,10)} 이에 著者 등은 既存 養液栽培 農家에서 사용되고 있는 양액탱크내에 튜브를 설치하여 地下水를 循環시키는 養液冷却方式에 대한 基礎實驗을 통하여 傳熱特性 分析과 適用性 檢討를 실시하였고, 모델에 의하여 冷却시스템의 設計에 필요한 養液冷却負荷 算定方法을 開發하여 검

토한바 있으며, 그 결과에 의하면 既存의 養液冷却方法으로 충분한 冷却效果를 거두기에는 不足한 것으로 나타났다.^{3,4,5)}

따라서 本 研究에서는 養液冷却의 效率를 向上시켜 여름철 水耕栽培 溫室의 作物生育環境을 改善할 目的으로 二重管式 逆對流型 熱交換方式을 適用시킨 養液冷却시스템을 開發하여 실험 및 이론적 해석에 의하여 熱交換特性을 分析하고 그 適用性を 檢討하였으며, 既存의 水耕栽培 農家에서 이용하고 있는 養液冷却方式과 비교하였다.

II. 材料 및 方法

1. 冷却시스템의 構造 및 測定方法

冷却시스템의 構造는 Fig. 1과 같다. 內徑 40mm의 PVC 파이프 내에 外徑 25mm의 스테인레스(stainless) 파이프를 넣어 스테인레스 파이프의 內부에 地下水를, 外部에 養液을 흐르도록한 二重管式(double pipe) 逆對流型(counter flow type) 熱交換器의 方式을 택하였다. 熱交換器의 外部는 폴리스틸렌(polysty

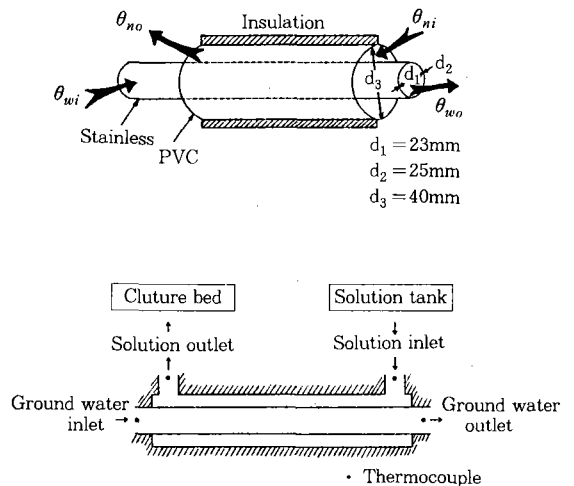


Fig. 1. Schematics of a cooling system of nutrient solution

rene)으로 斷熱을 실시하였다.

養液은 양액탱크로 부터 熱交換器를 거쳐 栽培베드로 流入되도록 하였으며, 熱交換器 入口와 出口에서의 養液溫度 및 地下水溫度를 0.3mm T형 熱電對(thermocouple)로 測定하고, 養液 및 地下水의 循環流量을 流量計(MW25, 대한정밀제품)로 測定하였다.

實驗은 地下水와 養液의 溫度差가 6~14℃, 지하수 通過流量은 약 0.9~8.8 l/min의 範圍에서 수행되었다.

2. 傳熱特性 分析

가. 熱交換量

本 實驗에 사용한 冷却시스템의 熱交換量은 다음 식과 같이 熱交換器의 入口와 出口에서의 地下水 溫度差 및 通過流量에 따라 決定된다.

$$Q = \dot{m}_w c_w (\theta_2 - \theta_1) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, Q 는 열교환량(kJ/hr), \dot{m}_w 는 물의 질량유량(kg/hr), c_w 는 물의 비열(kJ/kg℃), θ_1, θ_2 는 열교환기 입구와 출구의 지하수 온도(℃)이다.

나. 總合熱傳達係數

地下水와 養液은 스테인레스 파이프의 벽을 境界로 熱交換이 이루어지기 때문에 養液에서 지하수로 전달된 熱量은 總合熱傳達係數(overall heat transfer coefficient) 및 양액과 지하수의 平均溫度差에 의해서 표시된다. 따라서 總合熱傳達係數는 熱交換量的 實測值를 이용하여 다음식으로 결정할 수 있다.

$$U = \frac{Q}{A \cdot MTD} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, Q 는 열교환량(kJ/hr), U 는 총합열 전달계수(kJ/m²hr℃), A 는 열교환면적(m²), MTD 는 평균온도차(℃)이다. 이때, 平均溫度差는 일반적으로 對數平均溫度差(logarithmic mean temperature difference)를 많이 사용한다. 對數平均溫度差는 다음 식과 같이 나타낼

수 있다.

$$LMTD = \frac{(\theta_{n1} - \theta_2) - (\theta_{n2} - \theta_1)}{\ln[(\theta_{n1} - \theta_2)/(\theta_{n2} - \theta_1)]} \dots\dots (3)$$

여기서, $LMTD$ 는 대수평균온도차(℃), θ_{n1}, θ_{n2} 는 열교환기 입구 및 출구의 양액온도(℃), θ_1, θ_2 는 열교환기 입구와 출구의 지하수 온도(℃)이다.

이론적으로, 스테인레스 파이프의 벽을 통한 양액과 지하수 사이의 총합열전달계수는 파이프의 外部表面積을 기준으로 할때 다음식으로 표시된다.

$$U = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(d_o/d_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o}} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, A_i, A_o 는 파이프의 내표면적, 외표면적(m²), d_i, d_o, L 은 파이프의 내경, 외경 및 길이(m), h_i, h_o 는 파이프 내면과 외면의 對流熱傳達係數(kJ/m² hr℃), k 는 파이프 벽체의 熱傳導係數(kJ/m hr℃)이다.

파이프 內面에서의 對流熱傳達係數는 強制對流로서 층류와 난류로 구분하여 아래의 관계식 (5), (6)을 적용하였으며 遷移領域에서는 이들의 加重平均値를 적용하였다. 管內部的 흐름이 난류($Re > 4000$)인 경우는 Dittus와 Boelter(1930)가 제시한 다음의 관계식을 적용하였다.¹¹⁾

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, Nu 는 Nusselt수, Re 는 Reynolds수, Pr 은 Prandtl수를 나타낸다.

管內部的 흐름이 층류($Re < 2000$)인 경우는 Sieder와 Tate(1936)가 제안한 다음의 실험식을 적용하였다.¹¹⁾

$$Nu = 1.86 (Re \cdot Pr)^{1/3} \left(\frac{d_i}{L}\right)^{1/3} \dots\dots\dots (6)$$

한편, 스테인레스 파이프 외면에서의 대류 열전달은 기본적으로는 관내의 흐름에 대한

강제대류에 속하지만 관의 단면모양이 圓形이 아니므로 식(5)의 값을 실험치를 근거로 다음의 식(7)과 같이 補正하여 사용하였다.

$$Nu = (0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3}) \cdot C_{nu} \dots\dots\dots (7)$$

여기서, C_{nu} 는 斷面形狀에 따른 補正係數이다.

이상에서 정의된 Nusselt수를 이용하여 對流熱傳達係數는 다음과 같이 구한다.

$$\bar{h} = \overline{Nu} \left(\frac{k}{d} \right) \dots\dots\dots (8)$$

여기서, \bar{h} 는 평균 대류열전달계수(kJ/m²hr °C), \overline{Nu} 는 평균 Nusselt수, k 는 물의 열전도계수(kJ/m hr °C), d 는 특성길이(m)이며 원형단면인 경우에는 파이프의 직경을 나타내고, 원형단면이 아닌 경우에는 水力學的 지름을 사용한다.

다. 熱交換器의 有效性

일반적으로 實測值에 의한 熱交換器의 有效性(effectiveness)은 다음과 같이 定義된다.

$$\epsilon = \frac{\Delta T(\text{최소용량 유체의 온도차})}{\text{열교환기 내에서의 최대온도차}}$$

$$= \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{(\theta_{n1} - \theta_1)} \dots\dots\dots (9)$$

여기서, 最小容量 流體란 質量流量과 比熱의 곱($\dot{m}c$)이 최소인 유체를 의미하고, 본 실험에서는 지하수가 여기에 해당된다.

熱交換 시스템에서 要求되는 熱交換量을 充足시키는데 필요한 熱交換器의 크기나 流量등을 決定하기 위하여는 有效性和 傳達單位數(number of transfer units, UTU)의 關係가 매우 有用하다. Kays와 London(1964)은 逆對流型 熱交換器의 理論的인 有效性을 식(10)과 같이 誘導하였다.¹¹⁾

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-N(1-C)]}{1 - C \exp[-N(1-C)]} \quad (C < 1)$$

$$= \frac{N}{N+1} \quad (C=1) \dots\dots\dots (10)$$

여기서, $C = c_{\min} / c_{\max}$ (용량비), c_{\min} , c_{\max} 는 작동유체의 $\dot{m}c$ 의 최소치 및 최대치, $N = NTU = \frac{U \cdot A}{C_{\min}}$ 이다.

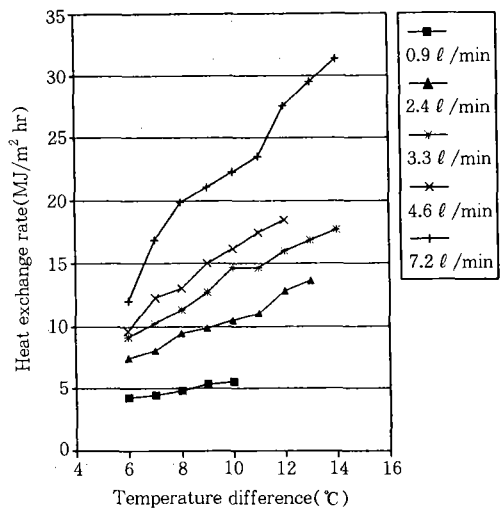
본 냉각시스템에서는 양액의 $\dot{m}c$ 가 c_{\max} , 지하수의 $\dot{m}c$ 가 c_{\min} 이 된다.

III. 結果 및 考察

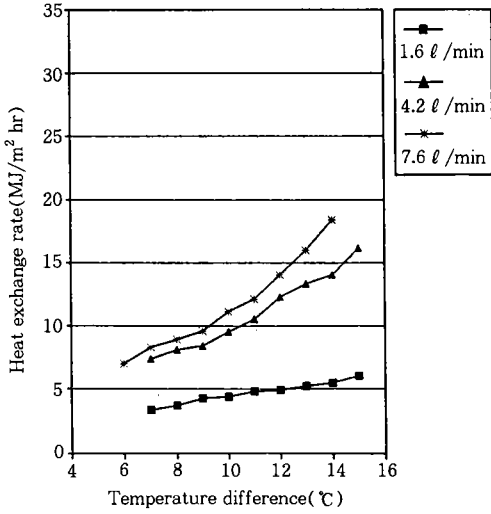
1. 冷却시스템의 熱交換量

地下水와 養液의 溫度差 및 地下水 通過流量의 變化에 따른 熱交換部에서의 단위면적당 熱交換量을 Fig. 2에 나타내었다.

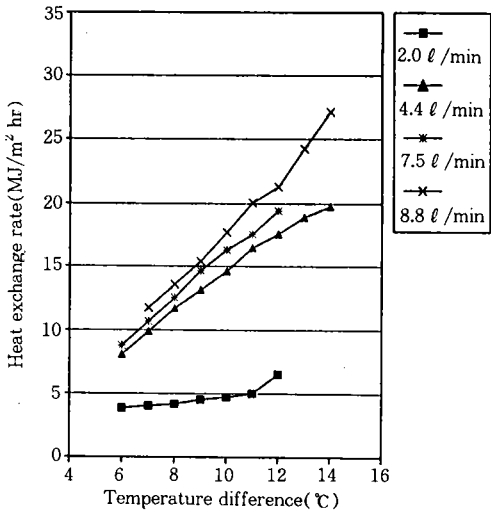
Fig. 2(a)는 양액의 유량 14.5 l/min, Fig. 2(b)는 7.0 l/min, Fig. 2(c)는 2.85 l/min인 경우에 대한 실험 결과로서 지하수와 양액의 온도차 및 통과유량이 클수록 단위면적당의 열교환량은 증가하였다. 지하수량이 같은 경우에는 양액의 유량이 클수록 단위면적당 열교환량이 크게 나타났다.



(a) Flow rate of nutrient solution, $F_n = 14.5$ l/min



(b) $F_n = 7.0 \text{ l/min}$



(c) $F_n = 2.85 \text{ l/min}$

Fig. 2. Heat exchange rates with the temperature differences between ground water and nutrient solution in various flow rates of ground water

2. 總合熱傳達係數

본 실험에 사용된 열교환기의 열교환 능력을 검토하고, 설계에 적용하기 위하여 總合熱傳達係數의 實測值를 理論值와 比較하였다.

Fig. 3은 식(2) 및 식(4)를 이용하여 구한 總合熱傳達係數의 이론치와 실측치의 관계를 비교한 것이다. 식(7)의 補正係數 C_{nu} 는 1.63으로 推定되었으며, Irvine(1963)이 제시한 높이와 폭의 비가 1:8인 직사각형 단면에서의 1.49와 폭이 매우 긴 직사각형 단면에서의 1.89의 중간 정도에 해당하는 것으로 나타났다.¹¹⁾

Fig. 3에서 보는 바와 같이 總合熱傳達係數의 실측치는 이론식에 의한 추정치와 잘 일치 ($R^2 = 0.94$)하는 것으로 나타났다.

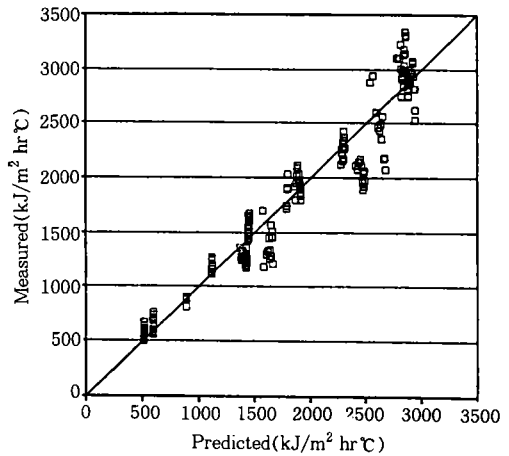


Fig. 3. Measured and predicted overall heat transfer coefficients of cooling system of nutrient solution

또 地下水 流量과 養液의 流量에 따른 總合熱傳達係數의 變化를 이론식에 의하여 비교해 보았다. Fig. 4는 지하수 유량을 1~10 l/min으로 변화시키면서 양액의 유량 5, 10, 15, 20, 25 l/min에 대한 總合熱傳達係數를 비교하여 나타낸 것으로서 양액과 지하수의 유량이 증가함에 따라 總合熱傳達係數는 급속히 증가하나, 流量의 增加에 따라 熱傳達係數의 增加率은 顯著하게 緩慢해지는 것으로 나타났다.

3. 熱交換器의 有效性

Fig. 5는 식(9) 및 식(10)에 의한 熱交換器

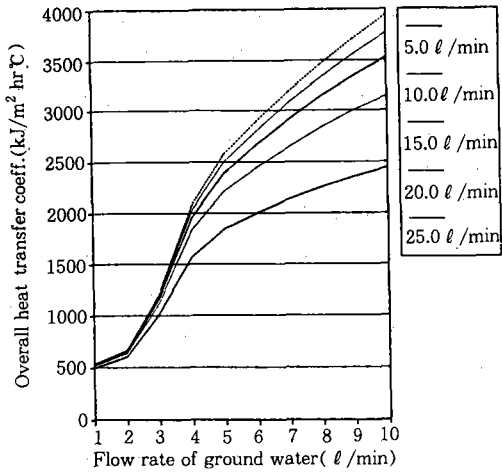


Fig. 4. Overall heat transfer coefficients with the flow rates of ground water and nutrient solution

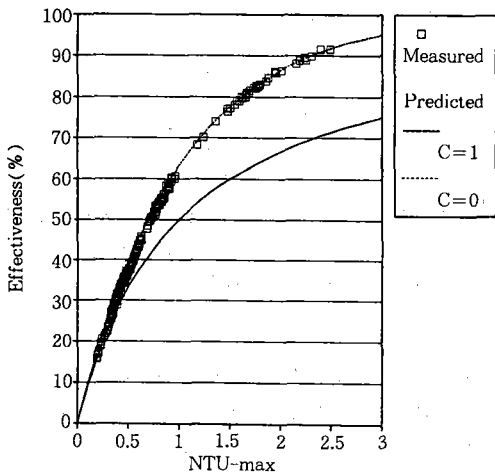


Fig. 5. Effectiveness of the cooling system with double pipe for the number of transfer units

有效性的 實測値와 理論値를 비교한 것으로서, 傳達單位數를 橫軸으로 하여 實驗用 熱交換器의 有效性和 두 流體의 mc 가 같은 경우($C=1$) 및 한 流體의 mc 가 다른 流體의 mc 에

비하여 매우 큰 경우($C=0$)에 대한 理論的인 有效性을 나타낸 것이다. 본 냉각 시스템의 경우 지하수에 비하여 양액의 순환유량이 훨씬 크므로 $C=0$ 쪽에 가까운 것을 알 수 있으며, 본 실험(열교환면적 약 $0.3m^2$)에서는 傳達單位數 0.2~2.5, 有效性 16~91%의 범위를 보였다.

4. 冷却시스템의 性能評價 및 適用性 檢討

本 二重管式 逆對流型 養液冷却 시스템의 適用性 檢討를 위하여 경기도에서 시행한 尖端 水耕栽培 圃地 設計資料중 $1,000m^2$ (300평)規模의 水耕溫室의 베드($15m \times 1.4m$) 3열에 熱交換器 1세트(길이 15m)를 설치하는 것으로 假定하였다. 이 경우 300평당 총길이는 120m로 南³⁾ 등이 報告한 양액탱크내 튜브 설치의 1세트 길이 130m와 거의 비슷한 수준이다. Fig. 6은 지하수와 양액의 온도차를 $10^\circ C$ 로 가정한 경우, 300평당 이용가능한 지하

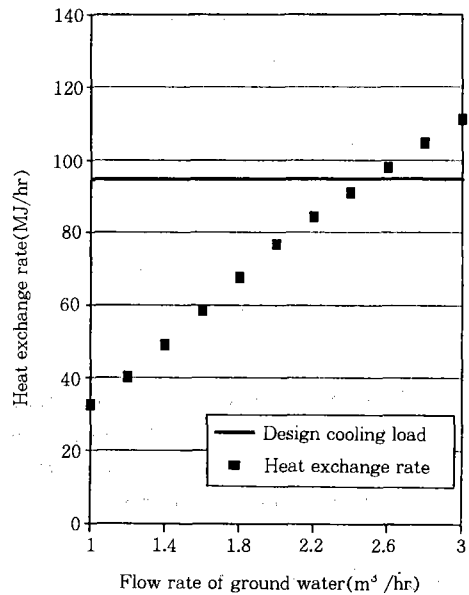


Fig. 6. Relationships among ground water flow rates, heat exchange rates and design cooling load

수량에 따른 冷却能力을 비교한 것으로서 南³⁾ 등이 보고한 이용가능 수량 2m³/hr에 대하여는 약 76,745 kJ로 設計冷却負荷의 약 81%를 커버할 수 있는 것으로 나타났다. 수원지방의 設計冷却負荷⁴⁾에 대하여 100%의 冷却能力을發揮하는 지하수량은 2.5m³/hr로 나타났다.

本 養液冷却用 熱交換 시스템은 지하수 펌프와 양액 순환 펌프를 可動시킬때 電氣 에너지를 消耗한다. 본 실험에 사용한 養液 循環 펌프의 給水量 및 所費電力量은 각각 20 l/min(양정 3m) 및 101 W이며, 地下水 펌프의 給水量과 所費電力量은 10 l/min(양정 45m) 및 185 W를 適用하였다.

일반적으로 冷暖房 裝置 등의 性能을 評價하기 위해서는 成績係數(coefficient of performance, COP)를 구하는 방법이 많이 이용된다. 本 냉각시스템의 成績係數는 冷却裝置를 구동하기 위해서 소비된 에너지와 열교환량을 기초로 하여 다음 식 (11)로 구하였다.

$$COP = \frac{Q_{cool}}{E_{gw} + E_{ns}} \dots\dots\dots (11)$$

여기서, Q_{cool} 은 냉각시스템에서의 열교환량(kJ), E_{gw} 는 지하수 펌프의 소비전력량(kJ), E_{ns} 는 양액 순환 펌프의 소비전력량(kJ)이다.

본 양액냉각 시스템의 실험 규모에서의 성적계수는 Table-1과 같고, 0.9~5.8의 범위를 보이며 평균 성적계수는 3.1로 나타났다. 즉, 사용한 電氣에너지의 약 3배에 해당하는 熱에너지를 이용할 수 있음을 의미한다. 그런데 水耕栽培時 冷却시스템을 설치하지 않더라도 양액순환 펌프는 可動을 해야 되므로 實際 成績係數는 이보다 더 클것으로 판단된다.

일반 농가에서 현재 사용하고 있는 養液탱크내에 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 튜브를 設置한 冷却方式과 스테인레스 튜브를 이용한 冷却方式에 대한 南^{3,5)} 등의 傳熱特性 分析結果와 本 研究에서 開發한 二重管式 逆對流型

Table -1. Thermal performance of nutrient solution cooling system

F_{gw}	F_{ns}	T_{dif}	$E_{gw} + E_{ns}$	Q_{cool}	COP
0.6	15.3	7.8	1029.6	966.0	0.9
0.9	14.4	8.3	1544.4	2233.5	1.4
1.1	16.6	8.5	2574.0	4690.0	1.8
1.6	2.8	9.3	2831.4	3423.8	1.2
2.0	5.7	8.9	1719.4	2282.9	1.3
2.4	13.6	8.7	1884.2	5286.9	2.8
2.4	14.2	9.7	2141.6	6454.2	3.0
3.3	14.5	10.7	1462.0	6346.0	4.3
4.2	3.1	9.5	2399.0	6640.5	2.8
4.4	7.6	9.2	1544.4	5908.5	3.8
4.6	16.7	8.2	1544.4	6081.0	3.9
7.2	13.0	8.8	1544.4	8907.0	5.8
7.3	14.2	8.2	1112.0	5698.1	5.1
7.5	7.3	8.1	1029.6	3840.0	3.7
7.6	2.6	9.1	1204.6	3657.4	3.0
8.8	7.4	9.5	1204.6	5962.3	4.9

Note : F_{gw} : Flow rate of groundwater(l/min)
 F_{ns} : Flow rate of nutrient solution (l/min)
 T_{dif} : Mean temperature difference between nutrient solution and groundwater

養液冷却시스템에 대하여 冷却性能을 비교 검토 하였다. 각각에 대하여 2m³/hr의 지하수를 이용하여 300평 규모의 수경온실에서 양액냉각을 실시할 경우의 냉각능력을 비교하여 Table-2에 나타내었다. 양액과의 온도차 10℃인 지하수를 이용할 때 양액탱크내에 폴리에틸렌 튜브를 설치한 경우 設計用 冷却負荷의 약 41%, 스테인레스 튜브를 설치한 경우는 약 70%, 二重管式 逆對流型의 경우는 약 81% 정도로 나타났다.

따라서 本 研究에서 開發한 養液冷却시스템은 양액탱크내에 폴리에틸렌 튜브를 설치하여 냉각하는 방식에 비하여 약 2배의 冷却能力을 보이고 있으며, 양액탱크내에 스테인레스 튜브를 설치한 경우 보다도 冷却能力이 약 15.8% 더 크게 나타났다.

Table -2. Cooling Capabilities of heat exchange methods

Heat exchangers	Heat exchange rates ¹⁾ (kJ/hr)	Cover ratios ²⁾ (%)
PE tube in tank	38,574	40.6
Stainless tube	66,252	69.7
Double pipe	76,745	80.8

Note; 1) Conditions of estimation

Greenhouse floor area : 1,000m²

Tank capacity of nutrient solution : 20m³

Flow rate of ground water : 2m³/hr

Heat-exchanger area : 9.4m²

Temperature difference between solution and ground water : 10℃

2) Maximum design cooling load : 95,000 kJ/hr

IV. 結 論

우리나라의 氣象條件으로는 여름철에 溫室內에서 作物의 정상생육을 기대하기 곤란하므로, 周年栽培를 위한 여름철 온실내 環境의 적정화는 온실재배의 當面 研究課題라 할 것이다. 本 研究는 夏節期에 水耕溫室에서 養液의 冷却를 통하여 根圈部の 液溫上昇을 抑制하고 作物의 生育環境을 改善하고자 수행하였으며, 구체적으로는 養液冷却의 效率를 向上시키기 위하여 二重管式 逆對流型 熱交換 方式을 適用시킨 養液冷却시스템을 開發하여 實驗 및 理論的 解析에 의하여 熱交換 特性을 分析하고 그 適用性을 檢討하였으며, 그 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 養液冷却시스템의 設計 및 實用規模로의 擴張을 위하여 熱交換器의 總合熱傳達係數를 理論적으로 誘導하고 實驗値와 比較한 結果 잘 일치하였다.

2. 地下水를 利用한 二重管式 逆對流型 養液冷却 시스템을 開發하여 實驗한 結果 熱交換 面積 0.3m²의 實驗規模에서 傳達單位數는 0.2 ~ 2.5, 有效性은 16~91%의 범위를 보였다.

3. 本 研究에서 開發한 二重管式 逆對流型 養液冷却 시스템의 成績係數는 0.9~5.8의 범위를 보이고, 平均成績係數는 3.1로 나타났다.

4. 養液과 地下水의 溫度差가 10℃이고 地下水量이 2m³/hr인 경우 冷却性能을 분석한 결과, 양액탱크내에 폴리에틸렌 튜브를 설치하여 냉각하는 방식의 경우 設計用 冷却負荷의 약 41%, 스테인레스 튜브를 설치한 경우는 약 70%로 분석 되었으며, 本 研究에서 開發한 二重管式 逆對流型의 경우는 약 81% 정도로 나타났다.

5. 本 研究에서 開發한 冷却시스템에 의하여 養液을 冷却할 경우 수원지방의 設計冷却 負荷를 充足하기 위한 地下水量은 2.5m³/hr로 나타났다.

6. 地下水가 豊富한 지역에서는 本 冷却시스템만으로도 充分한 養液의 冷却效果를 거둘 수 있겠지만 地下水 利用에 制限이 있는 지역을 위해서 좀더 效率이 높고 熱交換 面積을 크게 할 수 있는 시스템의 開發이 必要할 것으로 판단된다.

參 考 文 獻

1. 金文基, 南相運, 孫禎翼, 1991. 太陽에너지를 利用한 植物生産 시스템內의 養液栽培 環境調節에 關한 研究: 國內 養液栽培 實行農家の 實態調査, 韓國農業機械學會誌 16(2): 178-187.
2. 南相運, 金文基, 孫禎翼, 1992. 水耕栽培 시스템의 傳熱特性 및 養液冷却이 作物體溫에 미치는 效果, 서울大學校 農學研究誌 17(2): 97-104.
3. 南相運, 孫禎翼, 金文基, 1993. 地下水를 利用한 養液冷却시스템 開發에 關한 基礎 研究, 生物生産施設環境 2(1): 1-8.
4. 南相運, 金文基, 孫禎翼, 1993. 水耕溫室의 養液 冷却負荷 豫測모델 開發, 生物生産施設環境 2(2): 99-109.

5. 南相運, 1994. 水耕溫室의 養液冷却에 관한 研究, 서울大學校 博士學位論文.
6. 農漁村振興公社, 1994. 尖端農業施設發展方向, UR對應 農業實行事業 심포지움 資料.
7. 朴尙根, 金光勇, 李應鎬, 1990. 夏節期 養液栽培時 地下水를 利用한 液溫 降下 效果, 農試論文集(園藝編) 第32卷 : 12-15.
8. 孫禎翼, 1994. 養液組成 및 自動化, 科學營農과 水耕栽培 심포지움(韓國生物生產施設環境學會), pp. 9-19.
9. 위용호, 이순억, 1987, 空調衛生 設備實務 핸드북, 圖書出版 技多利.
10. 한길영, 이광식, 1984. 地下水를 利用한 夏節期 養液溫度 冷却效果 試驗, 慶南農振年譜 : 324-329.
11. Holman J. P., 1990. Heat transfer seventh edition, McGraw-Hill. New York, pp. 676.
12. Maletta M. and H. W. Janes, 1987. Interrelation of root and shoot temperatures on dry matter accumulation and root growth in tomato seedlings, J. Hort. Sci., 62 : 49-59.
13. 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.
14. McLendon B. D., R. B. Dodd, and J. M. Allison, 1981. Panel heating using polyvinyl chloride pipes(PVC), Trans. of the ASAE., 24 : 1287-1290.
15. McNeer M. L. et al., 1989. Analysis of an underground counterflow heat exchanger : Latent heat considerations, J. Agric. Engng Res. 43 : 163-173.
16. Mukai T. and Y. Ogura, 1988. Development of a technique for promoting flower-bud differentiation of strawberry plants by using night cooling NFT system, Environ. Control in Biol., 26 : 1-7.
17. Okano T. and Y. Yamamoto, 1986. Water thermal storage type solar greenhouse(1) : Thermal performance of a system for hydroponic culture, J. Agr. Met., 42 : 19-27.
18. Sasaki K. and T. Itagi, 1989. Effect of root cooling treatment of nutrient solution on growth and yield of tomato, cucumber and melon, Environ. Control in Biol., 27 : 89-95.
19. Tachibana, K., 1988. Combined effects of root and night air temperatures on the growth and mineral nutrition of cucumber : The effect on growth, Environ. Control in Biol., 26 : 61-67.
20. 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.
21. 吉田裕一, 大井美知男, 藤本幸平, 1987. NFTにおける培養液冷却の效果, 農業および園藝 62 : 650-652.
22. 佐佐木皓二, 佐藤紀男, 1990. 養液栽培によるトマトの高度集約生産システムの確立(2) : 栽培装置および根圏冷却効果について, 日園學雜 59 : 298-299.