

토양과 공기유동특성이 토양-공기 열교환기성능에 미치는 영향

Effects of Soil and Air Flow Characteristics on the Soil-Air Heat Exchanger Performances

김 영 복*

김 기 영**

정회원

정회원

Y. B. Kim

G. Y. Kim

1. 서 론

농업시설의 냉난방 환경제어를 위해 토양-공기 열교환기를 이용할 때 그 적정설계와 작동을 위해서는 토양-공기열교환기 성능에 대한 장치설계 및 작동변수의 영향이 분석되어야 한다. 그런데 실험적으로 여러변수에 의한 영향을 분석하려면 비용과 시간이 많이 들기 때문에 토양-공기 열교환시스템에 대한 이론모델을 세우고 지중매설관의 설계치수, 작동조건, 토양특성과 같은 입력자료에 따라 모델의 성능해석결과를 산출할 수 있도록 컴퓨터프로그램을 개발하고 그것을 이용하여 장치유입부의 공기온도와 공기유량과 같은 공기유동특성, 토양의 여러 특성이 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하는 것이 바람직할 것이다.

이와 관련하여 김(1997)은 토양-공기 열교환기의 성능을 분석할 수 있도록 해석모델을 정립, 컴퓨터프로그램을 개발하고 지중매설관의 설계와 물리적 특성이 시스템성능에 미치는 영향을 분석한 바 있다. Hendrick(1980)은 유한차분모델을 사용한 비정상상태 해석에서 열교환영향을 받지 않는 토양온도를 반무한 고체내에서의 엄밀해를 구하여 사용하였고, 토양의 성질이 토양-공기열교환성능에 크게 영향을 준다고 하였다. Spengler and Stombaugh(1983)는 유한차분법을 이용하여 매설관의 직경과 길이, 공기유량을 함수로한 성능분석시물레이션을 수행하였고, 매설관의 특성과 수분이동이 고려되어야 정밀해석이 가능하다고 하였다. Ahmed 등은(1983) 토양내에서의 열전달과 수분이동을 동시에 고려한 컴퓨터 모델을 개발하였는데 이 모델은 비정상상태의 2차원 좌표계에 한정되고 있다.

본 연구에서는 토양-공기 열교환기 성능분석 프로그램을 이용하여 공기유동특성으로서 공기의 장치유입온도, 공기의 유량, 토양특성으로서 토양의 열확산계수, 토양수분함량, 토양 초기온도를 선정하여 각 변수의 수준이 시스템성능에 미치는 영향을 분석하여 토양-공기 열교환기의 적정설계와 작동에 활용하고자 하였다.

* 경상대학교 농과대학 농업기계공학과

** 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과

2. 재료 및 방법

가. 수치해석모델

본 연구에서 토양과 공기의 열교환 과정은 지중매설관내를 통과하는 공기와 매설관 주위의 토양에 의해 이루어지며, 주로 전도와 대류, 물질전달에 의한다. 이 과정에서의 열교환성능분석을 위한 지배방정식은 에너지 및 물질평형방정식으로서 비정상 3차원 방정식이 되는데 이를 정리하면 다음과 같다(김, 1997).

매설관내 공기, 매설관 자체, 토양내 에너지 평형방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{2 \cdot H_c \cdot (T_t - T_a)}{\rho_a \cdot C_{pa} \cdot R_i} + \frac{k_a}{\rho_a \cdot C_{pa}} \cdot \frac{\partial^2 T_a}{\partial Z^2} - U \cdot \frac{\partial T_a}{\partial Z} \quad [1]$$

$$\rho_t \cdot C_{pt} \cdot V_t \cdot \frac{\partial T_t}{\partial t} = H_c \cdot A \cdot (T_a - T_t) + \frac{k_s \cdot A}{\Delta R} \cdot (T_s - T_t) \quad [2]$$

$$\rho_s \cdot C_{ps} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \cdot \nabla T_s) - Lg \cdot \nabla \cdot (\rho_1 \cdot D_{iv} \cdot \nabla M) \quad [3]$$

단, $\nabla = \frac{\partial}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial Y} + \frac{\partial}{\partial Z}$

토양내의 물질평형 방정식으로서의 수분이동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D_t \cdot \nabla T_s) + \nabla \cdot (D_i \cdot \nabla M) + \frac{\partial K_h}{\partial Y} \quad [4]$$

그리고, 공기의 획득에너지량은 방정식 [5]에 의해, 열교환효율은 교환가능한 최대에너지량에 대한 획득에너지의 비율로 정의되며 방정식[6]에 의해 계산된다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot (T_{aout} - T_{ain}) \quad [5]$$

$$\eta = [\dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot (T_{aout} - T_{ain})] / [\dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot (T_{s_{max}} - T_{ain})] \quad [6]$$

위 방정식들은 공기유동특성과 토양특성 수준에 따라 주어지는 초기조건과 경계조건하에서 수치해석되는데 본 연구에서는 유한차분법을 이용하여 토양과 공기온도를 음적차분근사하고, 형성된 연립방정식은 Gauss-Seidel반복법에 의해 해를 구하게 된다.

나. 입력변수 설계

토양-공기열교환기의 성능에 영향을 주는 인자는 토양특성과 지중매설관 특성, 공기의 유량과 유입온도 등이 있는데 지중매설관특성이 성능에 미치는 영향은 이미 분석한 바 있고(김, 1997), 본 연구에서는 토양특성과 공기유동특성이 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 변수의 입력값과 분석수준은 문헌을 참고하여 결정하였으며, 토양특성으로서 열확산계수는 토양비열과 열전도율을 고정시킨 채 토양밀도를 1000, 1500, 2000kg/m³의 3수준으로 변화시키므로서 조절하였고, 토양의 초기온도는 15, 20, 25℃의 3수준, 토양초기함수율은 10, 20, 30, 40%의 4수준으로 하였다. 그리고 공기유량은 0.1m³/s에서 0.5m³/s까지 0.1m³/s의 단계로 5수

준, 공기유입온도는 25, 30, 35℃의 3수준으로 하였다. 기본모우드는 토양밀도 1500kg/m³, 토양초기함수율 20%, 토양초기온도 20℃, 공기유량 0.2m³/s, 공기유입온도 30℃, 지중매설관직경 30cm, 지중매설관 길이 50m, 지중매설관 두께 1cm, 지중매설관 밀도, 열전도율, 비열을 각각 1000kg/m³, 0.329W/m·℃, 2260J/kg·℃로 하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 토양 열특성의 영향

토양의 열특성과 토양-공기 열교환기의 성능과의 관계를 분석하기 위해 토양의 열확산계수를 변수로 하였고 토양 열확산계수의 수준은 토양밀도를 변화시키므로서 조절하였다. 토양함수율이 일정할 때 토양열확산계수 수준과 토양-공기 열교환장치의 성능 특성과의 관계를 살펴보면 토양의 열확산계수가 증가하면 그와 비슷한 정도로 열교환 성능이 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 토양열확산계수는 토양의 열전도율에 비례하고 비열에 반비례하므로 토양의 열전도율이 크고 비열이 작을수록 열교환성능은 향상되는 것을 알 수 있다. 그런데 토양밀도는 커질수록 열확산계수를 작게 할 것으로 예상되지만, 실제의 경우 토양의 밀도는 토양의 열전도율과 비열에 영향을 주게 되어 이에 따라 열확산계수가 영향을 받게 된다.

토양열전도율은 中島(1982)의 자료를 회귀분석하면 $k=0.001 \cdot \rho - 0.63(kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C)$ 으로 나타나고 Kersten(1949)에 의하면 unfrozen silt and clay soils일 경우 $k=(0.9 \log(100 \cdot M - 0.2)) \times 10^{(0.01 \times \rho \times 0.06243)} \times 0.144 (W/m \cdot ^\circ C)$ 로 나타나게 된다. 또한, 밀도와 관련하여 토양의 비열은 Van Wijk and De Vries(1963)에 의하면 양토의 경우 $C_p=(1.3 + 4M) \times 10^6 / \rho (J/kg \cdot ^\circ C)$ 로 나타난다. 따라서 밀도에 따른 열확산계수의 변화는 적용하는 관계식에 따라 달라지게 되고 따라서 열저항의 크기도 변하게 된다(Salomone, 1984).

나. 토양수분의 영향

초기토양함수율이 증가할수록 토양과 공기의 열교환은 증가하지만 그 증가폭은 점차 둔화되는 것을 알 수 있었다. 토양함수율이 10%이면 시스템 열교환율이 약 30%, 토양함수율이 30%이상이면 시스템 열교환율은 약 45%정도 되는 것을 알 수 있었다. 이것은 토양함수율이 증가하면 토양열저항이 감소하기 때문으로서 Salomone(1984)에 의하면 토양함수율 0~30% 범위에서는 토양함수율이 증가함에 따라 토양내 열저항이 급속히 감소하고 그 이후에는 상당히 완만하게 변하게 되며, 토양함수율이 40%이상 이 되면 열저항은 그다지 변화가 없다는 것이 알려져 있다. 토양함수율은 40%이상 이 되면 밀도가 비록 낮은 토양이라 하더라도 100%포화되기 때문에(Kersten, 1949) 이에 따른 열전달영향은 그다지 변화가 없게 된다. 토양함수율이 토양열전달에 미치는 영향은 크게 보아 토양수분에 의한 토양의 겉보기

열확산율의 변화와 수분 이동량의 변화에 기인하게 된다. 토양의 겉보기 열확산율은 열전도율과 비열, 밀도에 관계되는데 토양수분함량이 증가하면 겉보기 열전도율은 증가하게 된다. 토양의 열전도율은 Kersten(1949)에 의하면 토양함수율에 따라 증가하며, 토양의 겉보기 비열도 中島(1982), Van Wijk and DeVries(1963)에 의하면 토양함수율에 따라 증가하게 된다. 그런데 토양함수율이 증가하면 토양의 겉보기 비열을 증가시키지만 열전도율이 더욱 큰 폭으로 증가하기 때문에 열전달이 촉진되는 것으로 판단된다.

토양함수율수준이 토양-공기 열교환장치 성능에 미치는 영향 중 수분확산에 의한 영향을 알아보기 위하여 토양의 증기상태 등온수분확산계수(Isothermal diffusivity of moisture in vapour form)의 수준을 변화시켜 보았으나 성능에는 거의 영향을 주지 않았다. 또한 토양함수율이 10, 20, 30%로 변하더라도 토양의 열전도율이 토양함수율 20%일 때와 동일한 수준으로 고정되었을 때에는 성능에 거의 영향을 주지 않을 것으로 나타났다. 즉, 비열이 토양함수율에 따라 변하지만 토양함수율에 따라 토양열전도율이 변하지 않으면 성능특성에 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 한편, 토양의 수분함량은 토양밀도에 따라 그 포화도가 결정되는데 토양밀도 $1,900\text{kg}/\text{m}^3$ 의 경우 토양함수율 15%, $1,300\text{kg}/\text{m}^3$ 의 경우 40%에서 100% 포화상태가 된다.

다. 토양초기온도의 영향

토양의 초기온도가 15, 20, 25℃일 때 매설관 유입공기온도가 30℃이므로 토양초기온도와 의 차이는 각각 15℃, 10℃, 5℃가 되는데 이때의 열교환성능을 살펴보면, 매설관유입공기온도와 토양초기온도차가 클수록 같은 경향으로 매설관유출공기온도와 에너지획득량이 커지는 것을 알 수 있었고 열교환율은 토양온도수준이 변하더라도 같은 것을 알 수 있었다. 즉, 열교환효율은 토양의 초기온도나 매설관 유입공기온도의 변화에 따라서는 변하지 않고 시스템 설계조건이나 공기유량에 의존한다는 것을 알 수 있었다.

라. 매설관입구공기온도의 영향

토양초기온도가 20℃이고 매설관 유입공기온도가 25, 30, 35℃일 때 매설관출구 공기온도는 각각 약 23, 26, 29℃로 나타났다. 즉, 유입공기 온도와 토양초기온도와의 차이가 5, 10, 15℃차이가 날 때 공기의 입출구온도차이는 약 2, 4, 6℃정도로 직선적으로 변하게 되는 것으로 나타났다. 이는 본 시뮬레이션과 비슷한 조건에서 수행한 김(1996)에 의한 실험적분석 결과와 같은 경향을 나타내고 있다. 한편 열교환효율은 매설관 유입공기온도의 수준과는 상관없이 약 40%정도로 일정한 값을 나타내었는데 이러한 현상은 시스템의 설계와 공기의 유동조건이 일정하기 때문으로 판단된다.

마. 공기유량의 영향

토양-공기 열교환시스템에서 지중매설관통과공기의 유량은 전열계수에 영향을 주게 되어

출구공기온도를 변화시킨다. 공기유량이 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 일 때 매설관출구 공기온도는 각각 약 24°C , 28°C 로 나타나며, 이때의 열교환효율은 각각 약 60%, 20% 정도로 나타났다. 이 때 유량이 규칙적으로 증가할수록 매설관 출구온도는 증가하고 이에 따라 입출구온도차는 감소하지만 그 변화의 정도는 점차 줄어들게 되는데 그 이유는 유량에 따라 레이놀즈수가 변하고 대류열전달계수는 레이놀즈수에 따라 지수적으로 변하기 때문으로 판단된다. 그런데 공기유량 수준과 에너지획득과의 관계에서는 공기유량수준이 변하더라도 에너지획득량은 그다지 차이가 없었는데 이것은 매설관직경이 일정한 조건에서 공기유량이 클 때는 대류열전달계수가 증가하더라도 지중매설관속에 체제하는 기간이 짧고 따라서 열교환시간이 짧아지며, 공기유량이 적을 때는 공기유속이 늦어서 그 반대의 결과를 가져오기 때문으로 판단된다. 즉, 공기유량수준변화는 출구공기온도에는 크게 영향을 주어도 에너지획득량에는 그다지 변화를 주지 않는다는 것을 나타내는데 이것은 토양-공기 열교환기의 사용목적과 주변상태에 따라 그 작동조건을 다르게 해야 한다는 것을 의미한다.

4. 요약 및 결론

농업시설의 열환경제어를 위해 토양-공기열교환기를 설치할 경우 그 적정설계와 작동을 위해서는 장치의 설계 및 작동변수들의 시스템 성능에 대한 영향이 분석되어야 하는 바 본 연구에서는 시스템을 구성하는 토양, 공기, 매설관에서의 전열현상을 지배하는 비정상 3차원 에너지·물질 평형방정식을 수치해석하는 컴퓨터 프로그램을 이용하여 토양의 특성과 공기유량, 공기유입온도의 수준이 시스템성능에 미치는 영향을 분석하였다.

토양의 열확산계수가 증가하면 그와 비슷한 정도로 토양-공기 열교환기의 성능이 증가하였으며, 따라서 토양 열전도율이 크고, 토양비열이 작을수록 열교환성능이 증가하게 된다.

토양의 초기수분함량이 클수록 열교환성능은 증가하지만 그 증가폭은 점차 둔화되어 토양함수율이 약 30% 이상이 되면 열전달 변화폭이 매우 둔화되는 것을 알 수 있었다. 토양의 초기온도와 매설관유입공기온도차가 클수록 같은 경향으로 열교환량은 증가하지만 열교환효율은 약 40% 정도로서 토양의 초기온도수준에 따라서는 변하지 않는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 매설관입구공기온도의 수준에 따라서도 같은 결과를 나타내었다. 공기유량이 증가하면 공기의 장치입출구온도차와 열교환율이 감소하게 되고, 열교환량은 약간 증가하게 되지만 유량에는 그다지 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

Nomenclature

A : 면적, C_p , C_{pa} , C_{ps} , C_{pt} : 비열, 공기와 토양 및 매설관의 비열
 Div, Dt, Di : 증기상태등온수분확산계수, 수분확산계수, 수분등온확산계수
 Hc : 대류열전달계수, k, k_a , k_s : 열전도계수, 공기와 토양의 열전도계수
 Kh : 수력전도율, Lg : 수분증발잠열, m : 매설관내의 유체유량

M, Minit : 토양내 체적함수율, 초기 토양함수율

Q : 공기의 에너지 획득량, R : 반경방향좌표, ΔR : 매설관 검사체적내 상당두께

t : 시간, T, Ta, Ts, Tt : 온도, 공기, 토양, 매설관의 온도

Tain, Taout, Tinit, Tsinit : 매설관 공기입구·출구·초기온도, 토양초기온도

u : 매설관내 공기의 유속, Vt: 매설관 검사체적

X, Y, Z : 직교좌표계, $\rho, \rho_a, \rho_i, \rho_t$: 밀도, 공기·수분·매설관 밀도

v : 3차원 미분연산자

5. 참고문헌

1. 김영복. 1996. 지중매설관 열교환장치의 성능분석 -연속운전실험에서의 온도특성 및 열교환성능-. 한국농업기계학회지. 21권 4호.436-448.
1. 김영복. 1997. 토양-공기 열교환기의 냉방성능 시뮬레이션 -해석프로그램 및 지중매설관 특성 영향분석-. 한국농업기계학회 1997년 동계 학술대회 논문집. pp. 249-254.
2. 中島康孝也. 1982. 蓄熱材料における土壤の熱的特性に関する研究(その1、2、3). 日本建築學會學術講演會梗概集
3. Ahmed E. Ahmed, M. Y. Hamdy, W. L. Roller, D. L. Elwell. 1983. Technical Feasibility of Utilizing Reject Heat from Power Stations in Greenhouses. ASAE. pp. 200-210
4. Hendrick, P. L. 1980. Performance evaluation of a terrestrial heat exchanger. pp. 732-736. In: J. Hayes and R. Snyder (ed.). Proceedings of the 5th National Passive Solar Conference, Vol. 52. American Section of the International Solar Energy Society, Newark, De.
5. Holman, J. P. 1986. Heat transfer. New York: McGraw-Hill.
6. Kersten, M. S. 1949. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. Bulletin No. 28, Engineering Experiment Station, University of Minnesota, Minneapolis, MN.
7. Spengler, R. W. and D. P. Stombaugh. 1983. Optimization of Earth-Tube Heat Exchangers for Winter Ventilation of Swine Housing. ASAE. pp. 1186-1193
8. Salomone, L. A. and Kovacs, W. D., 1984. Thermal resistivity of soils. ASCL Journal of Geo-Technical Engineering, Vol. 110, No. 3, March 1984, 375-389.
9. Salomone, L.A., Kovacs, W. D. and Wechsler, H., 1982. Thermal behavior of fine grained soils. National Bureau of Standards Building Science Series, BSS 149.
10. Van Wijk, W. R. and D. A. DeVries. 1963. Periodic temperature variations in a homogeneous soil. In W. R. van Wijk(ed.). Physics of Plant Environment. John Wiley & Sons, Inc., New York, 102-143.