

# 지중매설관 열교환장치의 성능분석(I)<sup>+</sup>

-연속운전실험에서의 온도특성 및 열교환성능-

## Performance Analysis of an Earth Tube Heat Exchanger(I) - Temperature Variation Characteristics and Heat Exchange Performance on the Mode of Continuous Operation -

김영복\*

정희원

Y. B. Kim

백 이\*

정희원

Y. Paek

### 1. 서론

환경제어형 농업생산시설이 증가하고 이에따라 에너지 다소비형 농업시설이 늘어나면서 자연에너지이용의 중요성이 증대하고 있다. 특히 자연에너지로서 지열에너지를 이용하고자 할 때 지하수를 직접 이용하는 것은 지반침하, 지하수 고갈 및 오염 등 많은 문제점이 나타나므로 지중열교환 방식을 채택하는 것은 그러한 문제점을 최소화하게 된다. 또한, 외기온에 비해 연중 온도변화가 적은 지중온도를 이용하면 여름철 냉방과 겨울철 난방의 두 기능을 수행할 수 있는 장점이 있다.

지중열교환방식의 연구로는 국내에서는 돈사용 목적의 지열교환기(오등, 1995), 온실보온용 지중매설 잠열축열시스템(송, 1994), 등에 대한 효과분석이 있고, 이론분석으로 지중매설 열교환장치 출구온도 예측에 관한 연구(김, 1996)가 있다. 재료 특성과 관련하여서는 온실내 지중열교환파이프의 재료 및 매설특성에 따른 온실내부온도와외의 관계에 대한 연구(高倉, 1981)가 있다. 특히, 최근의 長期연속실험을 통한 여름철과 겨울철의 냉·난방성능을 분석한 연구결과에 의하면(Baxter, 1994) 지중매설관 열교환 효율에 영향을 주는 세가지 요소는 외기온도, 매설관부의 토양온도, 매설관 길이 방향으로의 온도구배라고 하였다.

이러한 연구들을 통하여 살펴보면 지중매설관의 재료 자체의 열물리적특성은 열교환효율에 큰 영향을 주지 않으며(김: 1996, 山本: 1977) 매설관의 크기는 보통 20~30cm정도이지만 동일한 풍량의 경우 대구경(大口徑)파이프 한 개보다 소구경(小口徑)파이프를 다수 설치하는 것이 효율이 좋고, 또한 토양수분이 50%이상 포화되면 토양의 종류에 무관하다는(Spengler, 1983) 것이 알려져 있다. 본 연구에서는 농업시설의 냉난방에 이용하고자 지중매설관 열교환장치의 성능을 분석하였던 바, 연구목표를 정리하면 다음과 같다.

1) 주·야간 연속운전을 통하여 냉방과 난방의 가능성을 확인한다.

---

+ 이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

\* 경상대학교 농과대학 농업기계공학과

- 2) 매설관 통과 공기온도, 열교환량, 열교환효율, 성적계수를 분석하므로써 시스템의 성능을 평가한다.
- 3) 매설관 설치조건을 알아보기 위하여 매설관 주위의 토양온도와 열교환영향을 받지 않는 토양온도를 비교 분석한다.
- 4) 매설관 내부의 공기온도분포를 분석하므로써 적절한 매설관 길이에 대해 검토 분석한다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 토양공기 열교환장치 및 측정

토양-공기 열교환장치의 성능을 분석하기 위해 경상대학교 농과대학 부속농장의 포장에 그림 1과 같이 실험장치를 설치하였다. 매설관은 안지름 300mm, 두께 2.5mm의 외주에 9mm높이의 돌기가 있는 폴리에틸렌파이프로 하였다. 지중열교환용 매설파이프의 재질은 열전달율, 強度, 가격면에서 결정되어야 하는데 재료가 다르더라도 열교환효율에는 별로 영향을 주지 않는다는 것이 연구결과로 알려져 있으므로(김:1996, 高倉:1981) 본 연구에서는 시공이 쉽고 가격이 저렴한 폴리에틸렌 파이프를 사용하였다. 매설관은 라인 간격을 1m로 하여 세 개의 라인을 매설하였다. 사진 1에 나타난 바와 같이 두 개의 라인은 지중 2m깊이에, 한 개의 라인은 지중 3m의 깊이에 매설하였으며, 매설관은 4m길이 단위로 되어 있는 것을 같은 재질의 소켓으로 연결가공하여 전체길이 30m가 되도록 하였다. 세 개의 라인은 공동의 피트로 연결되어 송풍기에 의하여 공기가 흡입 통과해 나가도록 되어 있다. 매설작업은 포크레인을 이용하여 땅파기한 후 파이프를 설치, 되메우기를 하였으며 파이프 부분의 토양은 岩碎土로 이루어져 있었다. 매설관은 공기진행방향으로 1/100의 구배를 두어 매설관내의 응축수를 배출할 수 있도록 설치 하였다. 송풍기는 동력 750W, 정압 53mmAq, 풍량 65cmm의 사양제품이었으나 본 실험에서는 동력을 적산적력계로 측정, 계산한 결과 750W이었고, 풍량은 약 21cmm을 나타내었으며, 온도는 K타입(CA)열전대를 사용하여 30분 간격으로 다점온도기록계(40점)로 기록함과 동시에 IEEE488 card를 통하여 컴퓨터로도 입력, 저장하였다. 그리고 공기의 풍속, 습도, 전력 사용량, 매설관내 공기의 정압 등을 측정하였다.

실험은 매설된 라인의 가동수를 조절하며 수행되었는데 본 논문에서는 매설된 세 개의 라인 중 2m깊이의 2개라인에만 공기가 통과하도록 하여 실시한 결과를 나타내었다. 실험기간은 1996.8.24(토) AM 10:00 부터 8.26(월) PM 19:00 까지 주·야간 연속으로 57시간 측정 기록하였다.

### 나. 열교환 성능의 평가법

지중매설관 열교환장치의 성능을 평가하는 데에는 장치로부터 배출된 공기의 온도수준, 열교환량, 열교환효율, 성적계수 등이 있는데 그것들은 다음과 같이 정의된다.

(1) 열교환량 ( $\dot{Q}_{out}$ )과 최대열교환가능량 ( $\dot{Q}_{max}$ )

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{ain}) \text{-----}(1)$$

$$\dot{Q}_{max} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{soil} - T_{ain}) \text{-----}(2)$$

여기서,

$\dot{m}$  : 공기유량,  $C_p$  : 공기비열,  $T_{aout}$  : 매설관출구 공기온도  
 $T_{ain}$  : 매설관입구 공기온도,  $T_{soil}$  : 매설관깊이 토양온도

(2) 열교환효율( $\eta$ )

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{max}} \times 100(\%) \quad \text{----- (3)}$$

(3) 성적계수 (COP)

$$COP = \frac{Q_{out}}{\dot{W}} \quad \text{----- (4)}$$

여기서,  $\dot{W}$  : 송풍기 공급동력

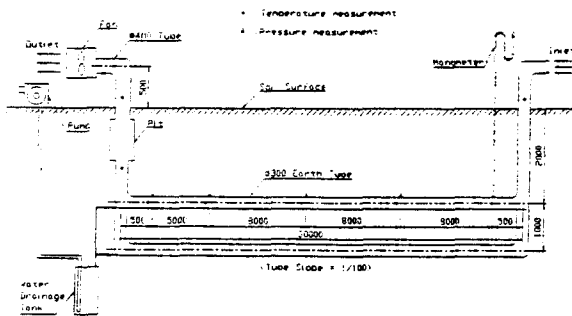


Fig. 1. Configuration of the soil air heat exchange system.

### 3. 결과 및 고찰

가. 매설관 입·출구 공기온도 변화와 열교환량

지중매설관 열교환장치로 들어오는 공기의 온도는 외기상태로서 그림 2에 나타난 바와 같이 약 17~18℃범위인데 지중매설관을 통과한 후에는 실험초기의 과도상태를 제외하면 약 24~25℃범위로 상당히 균일한 상태로 조화되어 나오는 것을 알 수 있다. 매설관 열교환 영향을 받지 않는 지중온도가 실험기간 중 약 24℃정도로 유지된 점을 고려하면 비록 매설관 부근과의 위치에 따른 온도차이를 예상하더라도 이러한 정도의 출구온도상태는 상당히 우수한 열교환능력을 보여 주는 것으로 판단된다. 지중매설관의 열교환효율은 토양의 수분함량에 따라 큰 영향을 받는데 이는 토양의 걸보기 열전도율이 향상되기 때문으로서 본 연구의 실험지역이 비교적 저지대여서 지중수분이 많은 까닭에 열교환효율이 우수한 것으로 판단된다. 열교환능력을 살펴보면 그림 2에 나타난 바와 같이 최대난방 2.51kW, 최대냉방 1.267kW의 값을 나타내었는데 냉방의 경우 본 실험기간 중 외기온도가 최대 약 28℃였으나 여름철 냉방상태가 매우 필요한 때인 주간온도가 이보다 높을 경우에는 본 시스템의 냉방능력이 증대될 것으로 보인다. 송풍기 배출유량당 최대 열교환율을 계산하면 난방과 냉방의 경우 각각 7.14, 3.571(kJ/m<sup>3</sup>)로 나타났다.

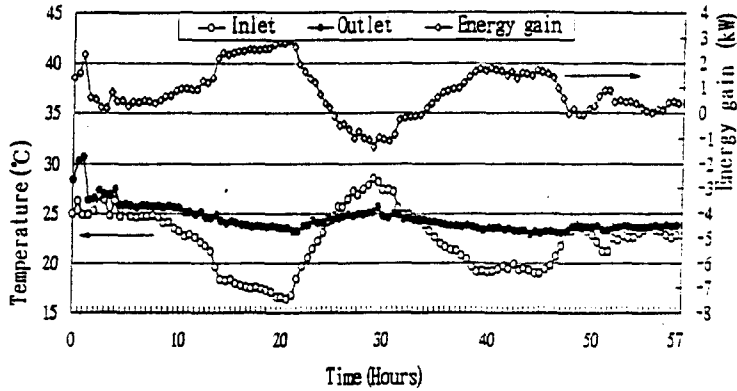


Fig. 2. Inlet and outlet air temperature and energy gain depending on time during 8/24-8/26, 1996.

#### 나. 열교환량과 성적계수

시간경과에 따른 에너지획득량을 외기온도변화, 즉, 지중매설관으로의 유입공기온도변화에 따른 에너지획득량으로 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3에는 투입 송풍기동력에 대한 에너지획득량의 비율인 성적계수를 동시에 나타내었으며 에너지획득량과 성적계수의 유입공기온도에 대한 상관관계를 표시하고 있다. 그림 3을 살펴보면 에너지획득량은 매설관 유입공기온도 약 24°C를 기준으로 온도가 올라갈수록 負의 에너지획득량, 즉, 공기의 냉각열량이 증가하고, 온도가 내려갈수록 正의 에너지획득량, 즉, 공기의 난방열량이 증가하게 되는데 이러한 경향은 그림에서 알 수 있는 바와 같이 비교적 직선적으로 변하고 있다. 이러한 결과는 파이프가 매설된 지중 2m위치의 지중온도가 대개 24°C정도로 유지되는 것을 고려하면 매우 당연하다 할 수 있다. 한편, 본 실험조건에서의 에너지획득량 ( $\dot{Q}$ ) 과 성적계수(COP)의 매설관 유입공기온도에 대한 이러한 직선적 변화 경향을 상관 관계식으로 나타내면 각각  $\dot{Q} = -0.3181 \times T_{ain} + 7.9(\text{kW})$ ,  $\text{COP} = -0.424 \times T_{ain} + 10.536$ 으로서 상관계수는 0.95로 나타났다.

#### 다. 열교환효율

지중매설관 열교환장치의 성능을 나타내는 한 척도로서 획득가능한 최대에너지량에 대하여 실제 획득한 에너지량의 비율을 나타내는 열교환 효율을 구해보면 그림 4와 같다. 그림 4에 나타난 경시별 측정자료 중 실험초기의 과도상태기간과 기상조건 변화로 인해 토양과 공기의 온도차가 적을 때 발생하는 오차를 제거하기 위해 실험 후기의 기간을 포함하지 않고 안정된 상태구간만을 대상으로 분석한 것으로서 연속 약 33시간동안의 열교환효율을 나타내고 있다. 그림을 살펴보면 매설관 토양온도와 매설관유입공기온도와의 온도차가 -4°C에서 8°C까지 변할 때 열교환효율은 약 65~100%범위에 산포해 있으며 평균 약 85.6%의 열교환효율을 보이고 있다.

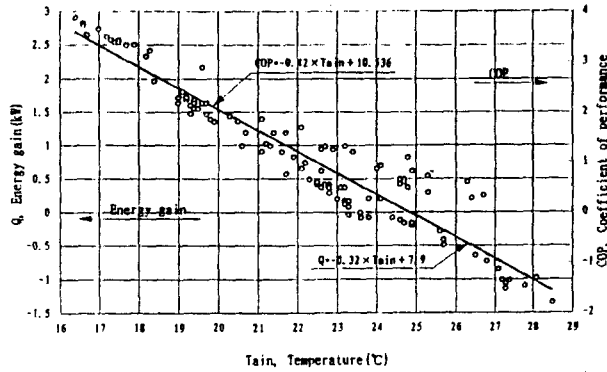


Fig. 3. Energy gain and COP depending on the inlet air temperature during 8/24-8/26, 1996.

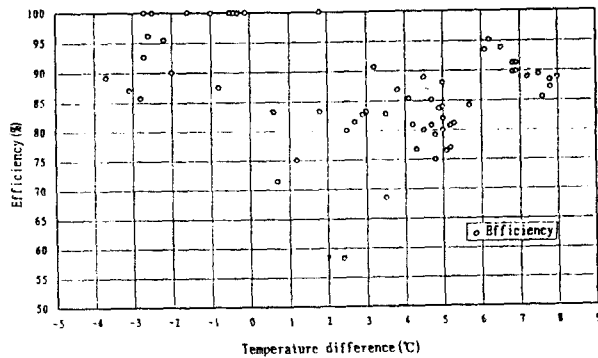


Fig. 4. Efficiency variation depending on the temperature difference between the soil and the inlet air temperature during 8/24-8/26, 1996

#### 라. 파이프내 공기온도분포

지중열교환 파이프 깊이의 결정과 관련하여 파이프내 공기온도 분포에 관한 정보는 매우 중요하다. 즉 공기가 지중매설관을 통과하는 동안 토양의 온도와 비슷해지게 되면, 더 이상 파이프를 통과시킬 필요가 없으므로 그 수준 범위에서 유효한 파이프의 길이를 결정할 수 있다. 실험결과 파이프 유입공기 온도는 외기에 따라 크게 변하고 있는데 비해 파이프내 각 위치에서의 온도 변화는 21m이후의 지점, 즉, 21, 29, 30m 위치에서는 토양 온도 부근에서 큰 변화가 없는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 환경보존형 에너지이용 방법으로서 지중매설관을 통한 토양공기 열교환을 도모하여 농업시설의 냉난방에 이용할 목적으로 실험을 통하여 지중매설관 토양공기열교환 장치의 성능을 분석하였다.

직경 300mm의 폴리에틸렌파이프를 지중 2m에 30m길이로 매설하여 주·야간 연속운전하

고 분석하였으며, 열교환량, 열교환효율과 성적계수, 매설관설치조건과 매설관적정길이에 대해 검토·분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 지중매설관장치의 영향을 받지 않는 토양온도는 약 3일간의 연속운전기간 중 외기온도가 약 17~28℃로 변하고 있을 때 지중 1m깊이에서는 약 26~28℃, 지중 2m깊이에서는 약 24℃, 지중 5m깊이에서는 약 20℃ 부근에서 유지되고 있었던 바 난방가능최대온도차 7℃, 냉방가능최대온도차 4℃로 나타났다.

나. 열교환능력은 최대난방 약 2.51kW, 최대냉방 약 1.26kW였으며, 송풍기 단위 유량당으로는 각각 약 7.14, 3.57kJ/m<sup>3</sup>, 성적계수는 난방 3.8, 냉방 1.8을 나타 내었다. 냉방성적계수 능력은 토양공기 최대온도차와의 상관관계로 보아 외기온도가 상승하면 상당히 향상될 것으로 판단되었다.

다. 본 실험조건에서 열교환량 ( $\dot{Q}$ )과 성적계수(COP)는 외기와 토양의 온도차 ( $\Delta T_{max}$ )를 변수로 하여 나타내면 각각  $\dot{Q} = 0.33 \times \Delta T_{max} + 0.134$ ,  $COP = 0.44 \Delta T_{max} + 0.178$ 로 나타나는데 이때 상관계수는 0.928이었다.

라. 매설관내 공기온도는 약 21m를 통과한 이후에는 큰 변화가 없었으므로, 본실험조건외 경우에 20m정도의 매설관길이를 하더라도 효율이 크게 나빠지지는 않을 것이나 매설관길이의 결정은 공기의 유속과 매설관직경, 토양조건등을 고려하여 검토할 필요가 있다.

## 5. 참고문헌

1. 김영복. 1996. 환경보전형 지열이용시스템에 의한 생물생산환경 제어기술. 제 10차 IBRD 교육차관 해외훈련보고서.
2. 송현갑, 유영선. 1994. 온실난방을 위한 태양열-잠열축열 시스템 개발. 한국농업기계학회지 19(3) : 211 - 221
3. 오인환, 김일수, H. J. Heege. 1995. 양돈용 지열교환기의 개발. 축산시설환경학회지. 1(2) : 125-136
4. 高倉 植, 山川建一. 1981. 地中熱交換ハウスの設計 1. 正常一次モデルによる解析. 農業氣象 37(3) : 187-196.
5. 山本雄二郎, 青木清, 岡野利明. 1981. 地中熱交換ハウス基本設計. 電力中央研究所. 研究報告 481011. 31
6. Baxter, D. O. 1992/1994. Energy exchanges and related temperatures of an earth-tube heat exchanger in the heating/cooling mode. Transactions of the ASAE Vol. 35(1) : 275-285/ 37(1) : 257-267
7. Diener, R. G., Moseley, J. L., Peterson, R. A., Jones, W.T. and Pentrack, M. L. 1990. Construction of an underground heat exchanger for broiler housing-with preliminary results. Applied engineering in agriculture Vol. 6(1) : 82-86.
8. Spengler, R. W., D. P.stombaugh. 1983. Optimization of earth-tube heat exchangers for winter ventilation of swine housing. Transactions of the ASAE 0001-2351/ 83/ 2604-1186 : 1186 - 1193