

# 수평형 지중열교환기의 열성능에 관한 연구

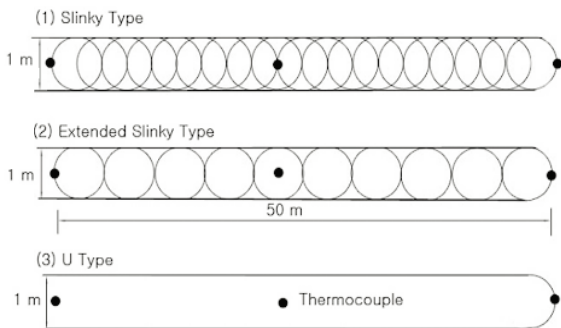
일반원고

백성권, 안형준  
코오롱건설(주) 기술 연구소 과장

## 1. 개요

국내에서 가장 많이 사용하는 밀폐형 지중열교환기는 수직형으로 이에 대한 연구는 많이 수행되었으나, 수평형에 대한 연구가 드물고 그 성능에 대한 검토가 미흡하여 본 연구를 수행하였다. 일반적으로 부지가 넓은 현장에 주로 적용되는 형태이며 그 시공방법이 간단하고 시공비가 수직형에 비해 저렴하기 때문에, 지중열교환기를 설치할 부지만 충분하다면 이 방법을 선호하는 것이 당연하다고 판단된다. 실제 미국에서는 학교와 복지시설의 경우 가장 많이 사용하고 있는 방법이기도 하다.

하지만 그에 비해 그 설계 용량과 시공방법에 대해서는 정확한 계산을 하기가 쉽지 않을뿐더러, 이를 검증할 데이터도 부족한 편이다. 본 연구 자료가 앞으로 국내에서 수평형을 시공하는데 있어서 작은 도움이 되기를 기대한다.



[그림 1] 설치할 수평형 지열교환기 제원

## 2. 수평형 지중열교환기

### 1. 수평형 지중열교환기 설치

수평형 지중열교환기의 성능평가를 위해 3 종류의 지열교환기를 설치하였으며, 외경 3.4(25호)의 HDPE 재질의 파이프를 사용하였다. 각 열교환기 마다 3개의 Thermocouple을 설치하여 위치별 온도의 변화를 측정하였다.

설치 깊이는 지표면에서 2.0 아래로 5.0 m 이하에 있는 지하수위의 영향을 크게 받지 않는다.



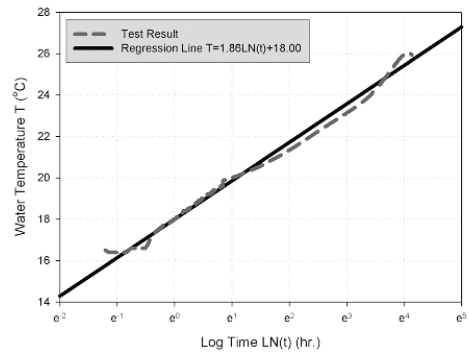
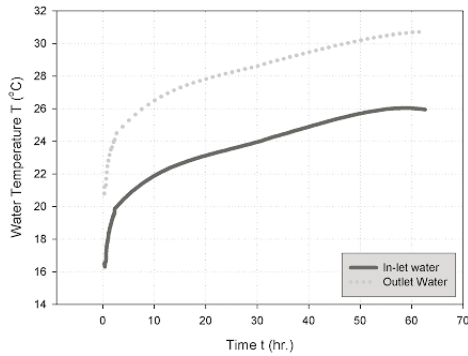
[그림 2] 슬링키 지중열교환기 시공 모습

<표 1> 3종류의 지중열교환기의 설치사양

	Slinky	Extended Slinky	U-밴드
루프 직경	1 m	1 m	0
트렌치 길이	50 m	50 m	50 m

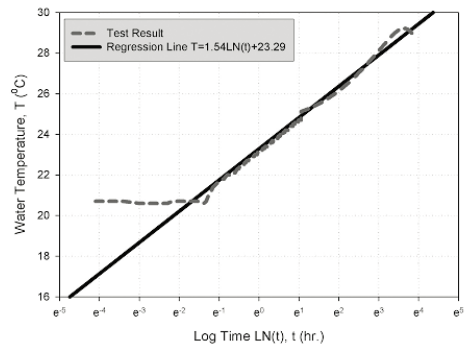
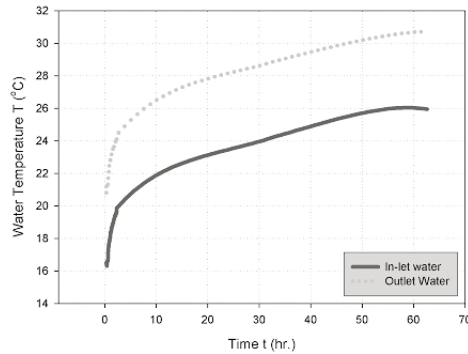
## 2. 열전도 시험 결과

### (1) 수평형 Slinky 타입의 열전도 시험 결과



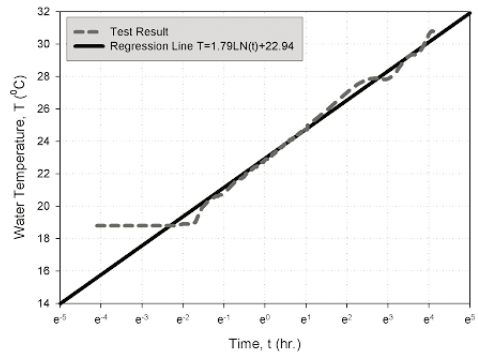
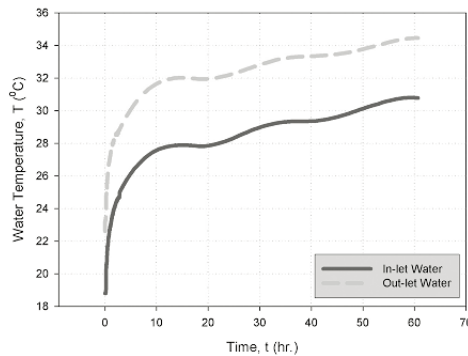
[그림 3] 슬링키 Slinky 타입의 열 거동

### (2) 수평형 Extended Slinky 타입의 열전도 시험 결과



[그림 4] 수평형 Extended Slinky 타입의 열 거동

### (3) 수평형 U 타입의 열전도 시험 결과



[그림 5] 수평형 U 타입 타입의 열 거동

### 3. 열전도율 비교

열전도율을 산출하는 기본적인 이론으로는 1차원 정상 상태의 열원 해석 방법이 사용되었다. 가열을 시작하여 최초 과도 상태 이후에는 온도 상승은 가열 전력 와 매체의 열전도율에만 좌우된다고 가정한다. 열전도율은 시각  $t$  에서 구한 온도 측정값으로 계산할 수 있다(Kosky and McVey, 1986).

$$k = \left( \frac{Q}{4\pi LAT} \right) \ln \frac{t_2}{t_1}$$

여기서,  $\Delta T$  = 시간 동안의 매질 온도차(K)

$Q$  = 히터의 전력(W)

$t_1, t_2$  = 가열 시작 및 종료 시간(s)

$L$  = 보어홀 깊이(m)

이다.

수평형이나 지하수형과 같이 선형열원 방정식으로 해석을 한 후 이 값을 수직형과 비교하여 그 성능을 판단할 수 있다. 즉, 열전도율은 50 m 깊이에 설치된 수직형 지중열교환기의 해석 방법으로 구하였다.

각 종류별 수평형 지중열교환기의 열전도율은 아래 표 2와 같다.

수직형과 비교해 열전도율이 상당히 작게 나타나며, 이는 지반매질의 특성과 흙의 다짐 문제와 설치 심도에 따른 지중온도의 문제 때문인 것으로

<표 2> 각 수평형 종류별 열전도율 비교

종류	열전도율(W/mK)	수직형 대비
Slinky	2.24	66%
Extended Slinky	2.08	62%
U	1.78	52%
수직형(비교기준)	3.40	100%

로 판단된다.

이상 결과에 의하면, 수평형은 수직형의 길이 대비 그 성능이 상당히 떨어지는 것으로 판단되며, 시공비의 절감 측면에서는 시공이 가능하나 효율적인 측면에서는 상당히 불리하다.

수평형의 성능을 높이기 위한 방법으로 아래의 시공 유의사항을 지킬 필요가 있을 것이다.

(1) 충분한 뒷채움재의 다짐: 지중열교환기와 지반 사이의 간극을 없애고, 지반내 간극도 줄여줌으로서, 지중열교환기의 열전도율을 향상시킬 수 있다.

(2) 충분히 깊은 심도에 설치: 본 연구에서는 지중 2 m에 시공하였으나, 보다 깊은 심도에 설치할 필요가 있을 것으로 판단되며, 2~5 m 사이가 가장 추천할만 하다. 현장 사정상 2 m 이하로 설치가 불가능할 경우 지표면 단열재 시공으로 대기의 온도 영향을 최소화 하여야만 한다.

## 3. 수평형 매트 지중열교환기

### 3.1 설치 개요

매트형은 일반 수평형에 비해 파이프 굵기가 가늘며, 설치면적을 효율적으로 활용할 수 있으므로 우수한 성능을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 지하수의 영향을 고려하기 위해 지하수가 있는 지표하 5 m와 지하수가 없는 지표하 2 m 지저에 각기 설치하였다. 이때 지중열교환기의 아래와 위

<표 3> 기존 지하수형과 비교

항목	기존 지하수형	개발 지하수형
냉각수 순환 형태	개방형	폐쇄형
지중열교환기 형태	보어홀 형태	다발형 PP 열교환기
굴착 깊이	100 미터 이상	2미터 이상
유효 지하수 형태	심층 피압 대수층	얕은 자유면 대수층

면에 미리 모래와 부직포를 아 뒷채움 시 지중 열교환기를 보호하였다.

(1) 굴착

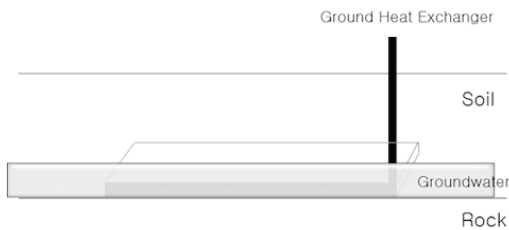
- 깊이 - 5 m
- 폭 - 2 m 이상
- 길이 - 4 m 이상

(2) 지하수량 계측

- 유속을 측정하여 유량을 계산하는 방식
- 1 cm/sec 이하의 분해능 필요

(3) 열교환기 설치

- 에이텍 폴리튜 시스템즈 제품(독일)
- 폴리프로필렌 모세유공 매트
- 2 m×3.6 m크기: 4 cm 간격, 4매 시공
- 지중열교환기 면은 모래와 부직포로 보호
- 용량: 약 1.2 kW



[그림 6] 지하수형 설치 개념

3.2 지하수 영향 평가

지열의 이용을 위해서는 지반특성에 대한 정보를 획득하는 것은 매우 중요한 과정이며, 이를 통해 지반에 부존되어있는 지열에너지 자원의 부존량 평가도 가능하다. 지반특성은 흙의 열전도도와 같은 열적 특성이 중요한데 지반의 열적특성에 큰 영향을 미치는 것이 지하수이다. 지하수의 존재와 유동에 따라 지중의 열분포와 열교환의 특성이 크게 달라지기 때문이다. 이를 고려하기 위해 본 연구에서는 현장시험을 통해 지하수 영향 평가를 시도하였다.

현장 시험은 경기도 용인시 포곡면 전대리에 위치하고 있는 코오롱 건설(주) 기술연구소 부지 내에서 수행 하였으며, 기간은 2005년 11월 30일



[그림 7] 매트형 지중열교환기



[그림 8] 지하수 양수



[그림 9] 지중열교환기 설치



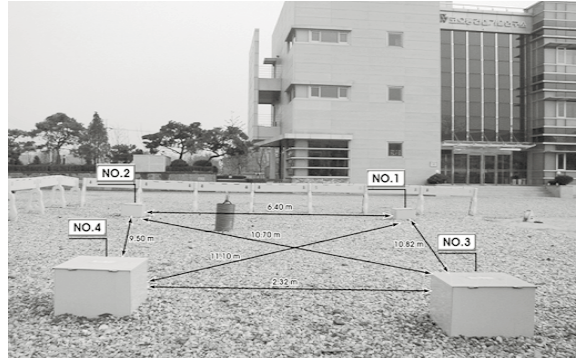
부터 12월 1일까지 실시하였다.

시험 목적은 부지 내의 지하수 특성을 도출하여 향후 지열에너지의 효율적 이용 및 개발의 위한 기초자료를 확보하는데 우선적인 목적이 있다. 시험 내용은 부지 내 지반의 투수성 및 저류성을 파

악하기 위해 주입시험과 양수시험을 실시하였다. 또한 과업지역내의 전반적인 지하수 유동체계 파악을 위하여 국제적으로 공인된 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) 프로그램을 이용하여 지하수 유동모델링을 수행하였다.



[그림 10] 시험지역 위치도



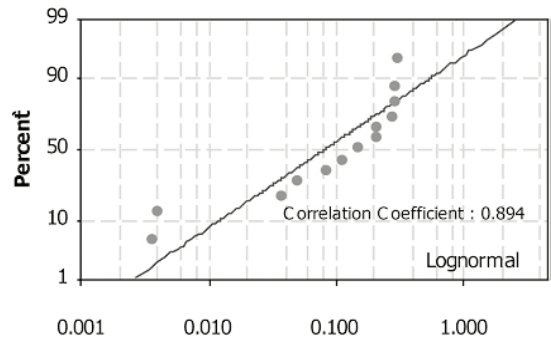
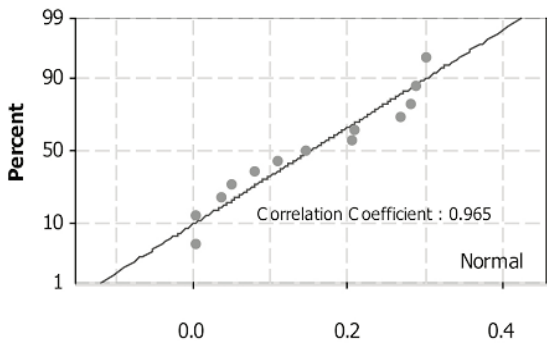
[그림 11] 시험지역 내 관정 현황도

시험방법 및 분석과정은 생략하기로 하고 시험결과를 간략하게 요약하면 우선 과업지역 내의 주요 매질은 자갈에서 중립질 모래로 구성되어 있었으며, 수리전도도(K)는 주입시험결과  $3.54 \times 10^{-3} \sim 2.04 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ , 양수시험결과  $2.09 \times 10^{-1} \sim 3.00 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$  로 나타났다.

대수층에서 산정한 수리전도도가 시험별, 해석

방법별 조금씩 차이가 나기에 이를 통계 처리하여 평균치(mean, average)로 표현하여 과업구간 내 대표 수리전도도를 산정하였다.

그림 12는 대수성 시험으로부터 얻은 자료를 이용하여 확률밀도분포도를 나타낸 것으로 수리전도도는 정규분포로 표현되며 대표 수리전도도는 산술평균으로 나타낼 수 있다.



[그림 12] 확률밀도 분포도

시험구간 내의 저류계수도 산술평균으로 계산하여 과업구간 대표값을 산정하였다.

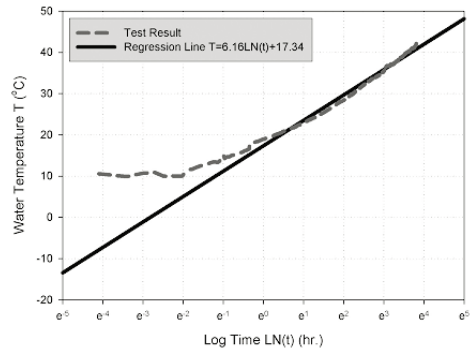
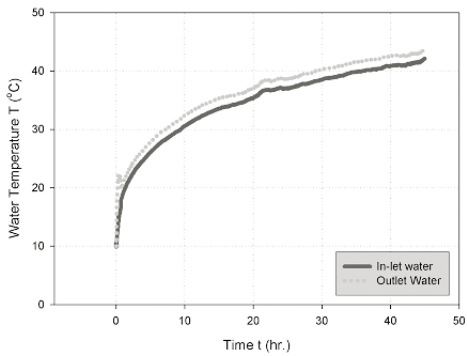
<표 4> 시험구간 수리상수 산정

해석방법	수리전도도 (K, cm/s)	저류계수 (S)
Lognormal	$2.48 \times 10^{-1}$	$1.76 \times 10^{-2}$
Normal	$1.52 \times 10^{-1}$	$1.77 \times 10^{-2}$

시험구간 내 대표 수리전도도(K)는  $1.52 \times 10^{-1}$  cm/s, 저류계수(S)는  $1.77 \times 10^{-2}$  으로 산정되었다.

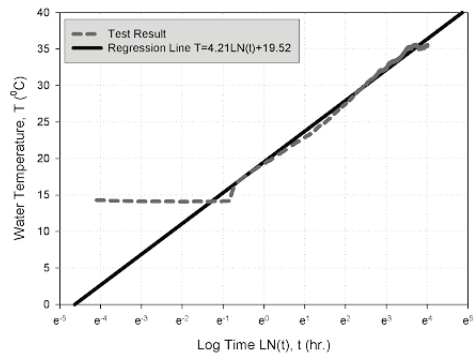
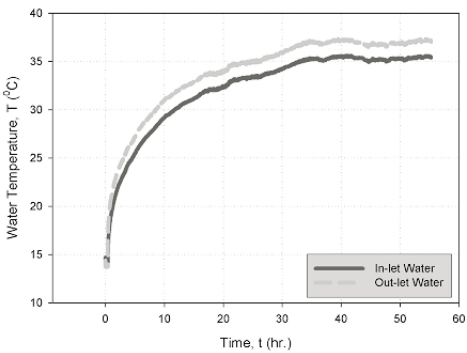
### 3.3 열전도 시험 결과

가. 지하수가 없는 지중 2 m 설치 지중열교환기



[그림 13] 지하수가 없을 때 모세유공 매트트의 열 거동

나. 지하수가 있는 지중 5 m 설치 지중열교환기



[그림 13] 지하수가 없을 때 모세유공 매트트의 열 거동

### 3.4 지하수형 지중열교환기의 열전도율

열전도율을 산출하는 기본적인 이론으로는 1차원 정상 상태의 열원 해석 방법이 사용되었다. 가열을 시작하여 최초 과도 상태 이후에는 온도 상승은 가열 전력 와 매체의 열전도율에만 좌우된다고 가정한다. 열전도율은 시각 과 에서 구한 온도 측정값으로 계산할 수 있다(Kosky and McVey, 1986).

$$k = \left( \frac{Q}{4\pi L \Delta T} \right) \ln \frac{t_2}{t_1}$$

여기서,  $\Delta T$  = 시간 동안의 매질 온도차(K)  
 $Q$  = 히터의 전력(W)  
 $t_1, t_2$  = 가열 시작 및 종료 시간(sec)  
 $L$  = 보어홀 깊이(m)이다.

수평형이나 지하수형과 같이 선형열원 방정식으로 해석을 한 후 이 값을 수직형과 비교하여 그 성능을 판단할 수 있다. 즉, 열전도율은 100 m 깊이에 설치된 수직형 지중열교환기의 해석 방법으로 구하였다.

폭 1 m로 환산하면, 트렌치 시공 길이는 7 m이며, 각 위치별 지하수형 지중열교환기의 열전도율은 아래 표 5와 같다.

<표 5> 폭 1m당 지하수형 지중열교환기의 열전도율 비교

종류	열전도율(W/mK)	수직형 대비
지하수가 없을 경우	4.54	134%
지하수가 있을 경우	6.84	201%
수직형	3.40	100%

이와 같은 시험결과에 따라 수직형에 비해 오히려 매트형 지중열교환기의 성능이 우수하며, 같은 매트형 지중열교환기라 할지라도 지하수의 영향을 받을 경우 66% 열전도 성능이 향상되었음을 알 수 있다.

## 4. 결론

다양한 수평형 지중열교환기에 대하여 시험적용 및 현장실험을 통해 성능을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 수평형 지중열교환기를 U자형, Extended Slinky형, Slinky형의 3가지 종류에 대하여 시험적용 및 현장성능평가를 실시하였다. 그 결과를 수직형 지중열교환기와 비교할 경우 각각 52%, 62%, 66%의 열교환성능을 나타내었다. 수평형 지중열교환기가 수직형에 비해 낮은 성능을 보이는 것은 예상되었으나 U자형에 비해 Slinky형의 성능이 약 27% 높은 것으로 나타나 예상보다 성능향상에 크지 않음을 알 수 있다. 이는 지중열교환기 설치시 다짐의 정도와 관련된 것으로 파악되어 수평형 지중열교환기의 설치시 다짐에 유의해야 할 것으로 판단된다.
2. 매트형 열교환기를 적용한 수평형지중열교환기를 개발하여 지하수가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 시험적용한 후 현장실험을 통해 성능을 평가하였다. 그 결과를 수직형 지중열교환기와 비교하면 지하수가 없는 경우에는 약 134%, 지하수가 있는 경우에는 약 201%로 높게 나타났다. 앞서 살펴본 U자형 및 Slinky형 지중열교환기에 비해 매우 높은 값으로 나타나 성능상으로는 유리하다. 하지만 매트형 열교환기는 세관으로 구성되어 지반에 설치할 때 손상될 우려가 크고 장기적인 성능의 확인이 필요하므로 향후에도 지속적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.
3. 이상과 같이 수평형 지중열교환기의 성능평가를 실시한 결과 부지가 큰 학교나 레저시설 등에서는 수평형 지중열교환기의 적용성이 높을 것으로 판단된다. 특히 설계상 성토와 같은 지반공사가 수반되는 경우에는 최소의 비용으로 높은 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- Allan, M.L.(1998), Geothermal Heat Pump Grouting Materials, BNL 65676.
- ASTM(1992), Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, American Society for Testing and Materials, D5334-92.
- ASTM(1997), Standard Test Method for Thermal Conductivity of Plastics by Means of a Transient Line Source Technique, American Society for Testing and Materials, D5930-97.
- Aston, D.(1973), Soil Temperature Data 1958-1972, Environment Canada, Atmospheric Environment Service, CLI-2-73.
- Austin, Warren A. III(1998), Development of an In-Situ System for Measuring Ground Thermal Properties, Masters Thesis, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.
- Bose, James E.(1980), Design and Field Testing of Solar-Assisted Earth Coils, Project Report DEAS03-79CS30210, 1 Aug. 1978-31 July 1980, Annual DOE Active Solar Heating and Cooling Contractors, Review Meeting, March 1980.
- Brown, W.G.(1963), The Temperature under Heated or Cooled Areas on the Ground Surface, Trans. Eng. Inst. Canada, Vol. 6, No. B-14, July.
- Chang, Jen-Hu(1958), Ground Temperature, Vol. 1, Harvard University, Blue Hill Meteorological Observatory, 21 June.
- Chiasson, Andrew D.(1999), Advances in Modeling of Ground-Source Heat Pump Systems, Masters Thesis, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.
- Chuangchid, Moncef Krarti Pirawas and Ihm, Pyeongchan(2001), Foundation Heat Transfer Module for Energyplus Program, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15.
- Crawford, C.B., and Legget, R.F.(1957). Ground Temperature Investigations in Canada, Engineering Journal, Vol. 40, No. 3 pp. 263-269, Mar.
- Culver, Gene and Lund, John W.(1999), Downhole Heat Exchangers, Geo-Heat Center Quarterly Bulletin Vol 20 No.3, September.
- DeVries, D.A.(1963), Thermal Properties of Soils in Physics of Plant Environment, W.R. Van Wijk, Ed., New York, John Wiley & Sons
- EPRI, NRECA, IGSHPA and Oklahoma State University(1989), Soil and Rock Classification for the Design of Ground-Coupled Heat Pump Systems, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.
- EPRI, NRECA, IGSHPA and Oklahoma State University(1994), Closed-Loop Geothermal Systems: Slinky Installation Guide, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.
- EPRI, NRECA, IGSHPA and Oklahoma State University(2000), Grouting for Vertical



Geothermal Heat Pump Systems, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.

Fuhrer, Oliver (2000), Inverse Heat Conduction in Soils: A New Approach towards Recovering Soil Moisture from Temperature Records, Diploma thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.

Gold, L.W. (1967), Influence of Surface Conditions on Ground Temperatures, Canadian Journal Earth Science, Vol. 4, p. 199-208, April.

IGSHPA and Oklahoma State University (1991), Grouting Procedures for Ground-Source Heat Pump Systems, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.

IGSHPA and Oklahoma State University (2000), Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems: Design and Installation Standards 2000, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.

Incropera, Frank P. and Dewitt, David P. (1996), Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons.

Jain, Nagendra Kumar (1997), Parameter Estimation of Ground Thermal Properties, Masters Thesis, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.

Kavanaugh, Stephen P. and Rafferty, Kevin (1997), Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, ASHRAE.

Kersten, M.S. (1949), Thermal Properties of

Soil, Bulletin of the University of Minnesota, Institute of Technology, 52, 1-225

Koski, J.A. and McVey, D.F. (1986), Application of Parameter Estimation Techniques to Thermal Conductivity Probe Data Reduction, Thermal Conductivity 17, Plenum Press New York, pp. 587-600.

Kluitenberg, G.J., Ham, J.M. and Bristow, K.L. (1993), Error Analysis of the Heat Pulse Probe for Measuring Soil Volumetric Heat Capacity, Soil Science Society of America Journal 57:1444-1451

Kujawa, Tomasz and Nowak, Władysław (2001), Numerical Simulation of Heat Extraction in the Geothermal Part of the Exchanger in One-hole System, Proceedings Geothermal Energy in Underground Mines, Ustronie, Poland, November 21-23

Kujawa, Tomasz and Nowak, Władysław (2001), Shallow and Deep Vertical Geothermal Heat Exchangers as a Low Temperature Source for Heat Pumps, Proceedings of the World Geothermal Congress 2000 published by International Geothermal Association

Lienau, Paul J., Boyd, Tonya L. and Rogers, Robert L. (1995), Ground-Source Heat Pump Case Studies and Utility Programs, Geo-Heat Center Oregon Institute of Technology 3201 Campus Drive Klamath Falls, OR 97601.

Lienhard, John H. IV and Lienhard, John H. V (2002), A Heat Transfer Textbook 3th Ed., Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts.

Lund, John W.(1999), Examples of Individual Downhole Heat Exchangers Systems in Klamath Falls, Geo-Heat Center Quarterly Bulletin Vol 20 No.3, September

NRECA, IGSHPA and Oklahoma State University(1988), Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems: Installation Guide, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.

Pahud, Daniel, Fromentin, Antonie and Hubbuch, Markus(1999), Heat Exchanger Pile System for Heating and Cooling at Zich Airport, IEA Heat Pump Centre Newsletter Vol. 17 - No. 1/1999.

Phukan, Arvind (1985), Frozen Ground Engineering, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

Sauer, Harry J. Jr. and Howell, Ronald H.(1983), Heat Pump Systems, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, N.Y.

Shonder, John A. and Hughes, Patrick J.(1998), The Evaluation of a 4000-Home Geothermal Heat Pump Retrofit at Fort Polk, Louisiana: Final Report, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

Shonder, John A. and Beck, James V.(1999), Determining Effective Soil Formation Thermal Properties from Field Data Using a Parameter Estimation Technique, ASHRAE Winter Meeting 1999 Chicago.

Shonder, John A. and Beck, James V.(2000), A New Method to Determine the Thermal

Properties of Soil Formations from In Situ Field Tests, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

Shonder John A., Martin, Michaela A., Hughes, Patrick J. and Thornton, Jeff(2000), Geothermal Heat Pumps in K-12 Schools, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

Szaflik, W?adys?aw and Stachel, Aleksander A.(2001), Variation in the Ground-Temperature Profile while Absorbing the Heat by Means of the Vertical Heat Exchanger, Proceedings Geothermal Energy in Underground Mines, Ustr , Poland, November 21-23

Yavuzturk, Cenk(1999), Modeling of Vertical Ground Loop Heat Exchangers for Ground Source Heat Pump Systems, PhD Thesis, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.

Yovanovich, Michael M.(1973), A General Expression for Predicting Conduction Shape Factors, AIAA 11th Aerospace Science Meeting, pp. 73~121, Washington, D.C., Jan.

Yovanovich, Michael M.(1974), A General Expression for Predicting Conduction Shape Factors, Progress in Astronautics and Aeronautics: Thermophysics and Spacecraft Thermal Control, Vol.35, p265

Van Haneghem, I.A., Van Loon, W.K.P. and Boshoven, H.P.A.(1991), Determination of the Thermal Conductivity of Moist Porous Materials near The Freezing Point, High Temperatures-High Pressures, Volume 23, pp. 157~162