

현장타설말뚝형 에너지 파일의 시공형태별 지중 열교환률에 관한 연구

The Effect of Construction Methods on Geothermal Exchange Rates of Cast-in-place Energy Piles

박용부¹ · 남유진² · 심영종³ · 손정락⁴

Yong-Boo Park¹, Yu-Jin Nam², Youngjong Sim³ and Jeong-Rak Sohn⁴

(Received March 20, 2012 / Revised April 18, 2012 / Accepted April 19, 2012)

요 약

최근, 지열 냉난방 시스템의 초기 공사비를 절감하기 위해 연구되고 있는 에너지 파일의 열교환률을 산정하기 위해 2종류(부속연결형, 슬링키형)의 현장타설말뚝형(PRD, 시공심도 4.5m, 직경 1,200mm) 에너지 파일을 시험시공하고 수치 시뮬레이션에 의해 효율을 상호 비교하였다. 상호 비교결과에 의하면 지중 교환률은 운전시작과 함께 채열에 의한 지중온도의 저하에 의해 점점 감소하였고 부속연결형의 평균 열원수의 온도차는 난방운전에서 0.37°C, 냉방운전에서 0.34°C로 나타났다. 또, 부속연결형의 난방운전시 열교환률 231.4W/m보다 냉방운전의 방열률은 252.2W/m로서 9% 높았고 슬링키형은 난방 기간 평균 열교환률이 168.0W/m로 부속연결형에 비해 약 27% 낮은 열교환률을 얻었다.

주제어 : 현장타설형 에너지 파일, 지중 열교환률, 냉난방 운전

ABSTRACT

In recent, there are many studies associated with energy piles to save initial construction cost for ground source heat pump system. In this study, to evaluate geothermal exchange rates two types (a connection type and a slinky type) of cast-in-place energy piles (PRD, 4.5m in depth, 1,200 mm in diameter) were constructed for the tests and their efficiencies were compared with numerical analysis results. As a result, starting with operation, geothermal exchange rate gradually decreases due to exchange of lower ground temperature. In the case of connection type, temperature difference is 0.37°C in heating mode and 0.34°C, in cooling mode, respectively. In addition, in case of a connection type, geothermal exchange rate in heating mode is 2,314W/m and in cooling mode, 252.2W/m whose value is 9% higher than in heating mode. In the case of slinky type, the average geothermal exchange rate in heating mode is 168.0W/m, which is about 27% lower than that of connection type.

Key words: Cast-in-place Energy Pile, Geothermal Exchange Rate, Cooling-Heating Mode Operation

1. 서론

기후변화, 지속적인 유가상승과 화석연료 등 에너지 자원 고갈이 국제적 관심사가 되면서 지열, 태양광, 풍력 등 신재생에너지 이용에 대한 관심과 적용실적이 증가하고 있다. 그 중 연간 일정한 기온을 유지하는 지반이나 지하수를 열원매체로 하여, 외기온도와의 온도차를 이용하는 지열 냉난방(Ground Source Heat Pump, GSHP) 시스템은 지열의 거대한

포텐셜과 시장 성장 가능성으로 관련 업계의 관심과 주목을 받고 있다. 신재생에너지의 특성상 초기 투자비가 크게 증가하므로 지열 에너지를 공동주택 냉난방 에너지원으로 보급확대를 위해 초기 공사비 절감, 특히, 지반천공비 절감이나 기초를 이용한 기술개발 방안이 요구되고 있다. 이런 측면에서 구조물 기초하부를 이용한 에너지 파일(건물의 기초파일을 지중열교환기로 이용하는 기술, 이하 에너지파일)이 PHC 말뚝 중공부나 현장타설말뚝 보강재를 이용하여 많이 시공되고

본 논문은 “구조물 기초를 이용한 지중열교환기 설계 및 시공기준 개발(2010)”를 바탕으로 작성하였음.

1) LH 토지주택연구원 건설환경연구실 수석연구원(주저자: parkyb@lh.or.kr)

2) 청주대학교 건축공학과 교수(교신저자: namyujin@cju.ac.kr)

3) LH 토지주택연구원 건설환경연구실 책임연구원

4) LH 토지주택연구원 건설환경연구실 연구위원

있다. 국내에서는 PE를 이용한 U형 에너지 파이프 이외에 PB를 이용한 코일형 에너지 파이프도 많이 시공되고 있다. U형 지중열 교환기를 사용한 PHC 에너지 파이프는 시공실적도 많고 PILESIM2를 이용한 설계가 가능하다. 그러나, 코일형을 이용한 에너지 파이프는 정확한 설계방안이 없으므로 지중으로부터 열교환가능한 열교환량 설계가 곤란한 현실이다. 따라서, 지열시스템의 올바른 설계 및 시공을 위해서는 기본적으로 지중열 교환량 검토가 선행되어야 하고, 정확한 설계 프로세스를 통한 예측이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 PRD 현장타설말뚝에 2종류의 지중열 교환기 파이프를 삽입하는 시험시공을 실시하고 현장 열전도도 측정 및 FEFLOW에 지중 열교환 모델과 지표면 열평형 모델을 조합하여 지중열교환량을 상호 비교하였다.

2. 지열시스템의 지중 열교환량 검토법

2.1 경험치에 의한 계산법

단독주택 등 부하패턴이 단순한 경우, 개략적인 방법에 의해 산출하는 것이 가능하다. 부하량이나 지반조건 등에 따라 차이가 발생할 수 있지만, 축적된 실험 및 해석결과의 경험치에 의하면, 지중으로부터 1m당 40~50W를 연속적으로 열교환이 가능한 것으로 알려져 있다. 이러한 경험치를 설계에 적용하기 위해 식 (1)과 (2)를 이용하면 개략적인 굴착심도를 산출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{난방시 소요 굴착심도}(m) \\ = \text{최대 난방부하}(W) \times \frac{\frac{COP-1}{COP}}{40 \sim 50(W/m)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{냉방시 소요 굴착심도}(m) \\ = \text{최대 냉방부하}(W) \times \frac{\frac{COP-1}{COP}}{40 \sim 50(W/m)} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, COP(Coefficient of Performance)는 최저 허용온도시의 히트펌프 효율을 의미한다.

이때, 냉방 및 난방 소요 굴착심도를 산출하여, 그 중 큰 값으로 결정한다. 예를 들어, 연면적 120m²인 주택의 최대 난방부하를 6kW라고 가정하고, 이때 사용되는 히트펌프의 COP를 4라고 하였을 때, 소요 굴착심도는 90~113m라는 것을 알 수 있다. 한편, 공동주택과 같이 소요 굴착 심도가 수천m 이상으로 산출되면 최저 공사비에 해당하는 천공개수와 단위 천공심도를 설계를 할 수 있다. 하지만, 이러한 방법은 지중온도가 항상 일정하게 회복되고 부하패턴의 변동이 심하지 않는다는 조건이므로, 보다 정확한 지열 시스템의 설계를 위해서는 설계용 프로그램에 의한 계산이 필요하다.

2.2 열저항에 의한 계산법

미국 등에서 사용되고 있는 가이드북에서는 수직밀폐형과 수평형에 대해서 필요 지중열교환기 길이를 식 (3)에 의해 계산하고 있다.

$$\begin{aligned} \text{난방시 소요 굴착심도}(m) = \text{최대 히트펌프 출력}(W) \\ \times \frac{COP-1 \times \frac{(R_p + R_s F_H)}{COP}}{\text{최저 지중열온도}(^{\circ}\text{C}) - \text{열원수의 최저 허용온도}(^{\circ}\text{C})} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, R_p 는 U형 심도 1m당 굴착공 내부의 열저항(mK/W), R_s 는 U튜브 깊이 1m당 지반의 열저항(mK/W), F_H 는 1월(난방 피크월)의 히트펌프 가동율을 의미한다.

상기 파라미터 중, 최대 히트펌프 출력, COP, 열원수의 최저 허용온도는 설계자가 사용하는 히트펌프의 성능에 의해 결정된다. 최저 지중열 온도는 천공심도가 10m 이상이면 항온으로 간주된다. 단, 열원수의 최저 허용온도와 COP의 관계를 올바르게 설정하지 않으면 계산결과에 큰 차이가 발생할 수 있다.

2.3 정밀법에 의한 계산법

일반적으로 지열 냉난방 시스템에서 히트펌프와 2차측 시스템은 종래의 공기열원방식에서 이용되는 것이고, 그 부분의 해석은 건축설비공학이나 기계공학분야에서 해석틀이 개발되어 이용되고 있다. 하지만, 지열 냉난방 시스템에서 가장 중요한 부분으로서 관련연구가 가장 활발하게 진행되고 있는 것은 지중열교환기를 포함한 지중부의 온도계산이다. 토양을 구성하는 고체, 액체, 기체의 3상에 대해 열이동과 물질이동이 동시에 일어나며, 거의 무한에 가까운 지중의 온도를 수치해석으로 계산하기 위해서는 방대한 시간과 노력이 필요하다. 따라서, 극히 한정된 부분만을 제한하여 수치해석하거나 무한고체로 가정하고 이론계산을 응용한 설계법이 개발되었다.

특히, 미국과 유럽에서는 1980년대부터 지열 냉난방 시스템을 중심으로 지하의 열을 이용하는 기술이 발달하고 시스템 설계를 위한 해석틀의 개발을 위한 수많은 연구들이 진행되어져 왔다. 지중열교환량의 해석에서는 지중열 교환기를 무한 고체내에 존재하는 열선 또는 원통으로 가정하여 계산하는 선형 열원이론(Line Source Theory, Carslaw and Jaeger, 1946)에 근거한 연구가 대부분이다. 이 이론을 통해 열교환기 주변 공간내 온도장에 중첩 원리를 적용하는 것이 쉬우므로 지중열 교환기의 다양한 배치형태일 때 효과적이다. 이러한 장점들을 이용하여, Eskilson(1987)은 무한 선형 열원의 온도장을 중첩시켜 산출한 무차원 온도응답계수 g-function을 지중열교환기 배열형태를 고려하여 다양한 배열에 대응할 수 있게 응용개발하였고, 현재 유럽에서 널리 쓰이고 있는 지

표 1. 국내외 주요 GSHP 시스템 설계툴(남유진, 2009)

명 칭	평가가능항목	특징
EED	지중열교환기길이, COP, 소비전력	- G.Hellstrom, B.Sanner교수 등 개발 - g-function이용 - 복수의 열교환기해석에 효과적
GchpCalc	지중열교환기길이, COP, 소비전력	- 무한원통이론 이용 - 상업용시스템에 효과적
GHLEPro	지중열교환기길이	- Oklahoma대학 J.D.Spitler교수 등 개발 - g-function이용
GLD	지중열교환기길이, COP, 소비전력	- 수평형, 수직형, 표면수열원형 등에 적용가능
CLGS	지중열교환기길이, COP, 소비전력, 운전코스트	- Oklahoma대학 개발 - 주택용시스템에 효과적 - 경제성평가 가능
FEFLOW +열교환기모델	지중온도, 지중열교환량, COP, 운전코스트	- 남유진, Tokyo대학 Ooka교수 등 개발 - 상세지중온도, 지중열교환량 예측 가능 - 지하수 및 지중열환경평가 가능
GroundClub	지중열교환기길이, COP, 소비전력, 운전코스트	- Hokkaido대학 Nagano교수 등 개발 - 복수 열교환기 해석 가능

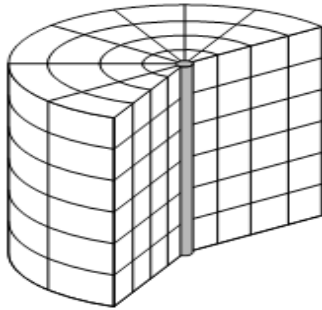


그림 1. 무한원통이론

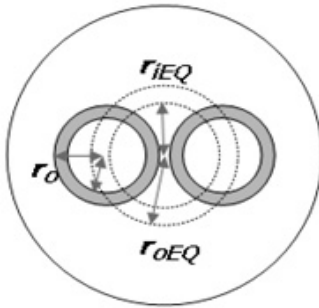


그림 2. 등가단면적모델

열설계툴인 EED(Earth Energy Designer)에 사용되고 있다(표 1). 한편, Kavanaugh(1984)는 무한원통이론(Cylindrical Heat Source model)에 근거하여 지중열교환기 주변의 지중온도와 내부 열매온도를 계산하는 방법을 개발하였다(그림 1). 무한원통 이론은 지중열교환기를 무한고체내에 존재하는 원통으로 가정하며, 선형 열원이론의 오차를 줄이고 원통주위의 순간적인 지중온도 계산에서 높은 정확도를 가지는 장점이 있다. 또한, 등가단면적모델을 이용하여 굴착공과 U형 파이프사

이의 열저항을 계산하는 방법을 개발하여 상용프로그램에 적용하였다(그림 2). 미국과 유럽에서 개발된 대부분의 지열설계 상용프로그램은 Eskilson과 Kavanaugh의 계산수법을 이용하고 있다.

한편, 본 연구에서는 남유진(2009)이 개발한 지하수 및 지중 열이동 해석코드 FEFLOW에 지중열 교환 모델과 지표면 열평형 모델을 접목한 해석수법을 이용하여 다층 지반구성 및 지하수류 효과에 대한 정밀해석과 지중 열환경 분석을 실시하였다.

3. 현장타설말뚝형 에너지 파일을 대상으로 한 지중열교환량 검토법

3.1 지중열교환량 검토 시뮬레이션 개요

본 연구에서는 현장타설형(PRD) 에너지 파일을 대상으로 한 지중열교환량 예측을 위해, 지중열 및 지하수 이동 시뮬레이션 코드와 지표면 열플럭스 모델, 순환수 이동모델을 연성한 해석수법을 이용하였다. 그림 3은 본 연구에서 이용된 해석툴의 개요도를 나타낸다. 토양 열전도도 시험(Thermal Response Test) 또는 지질데이터 등을 이용하여 시뮬레이션에 필요한 열물성치를 파악하고, 개발된 시뮬레이션 코드에 냉난방 부하 스케줄을 입력하여 지중으로부터의 열교환량 및 히트펌프의 COP를 계산하는 방법이다. 또한 지중열교환기 주변 토양온도를 예측하여, 지중열 환경에 대한 영향도 검토가 가능하다.

3.2 지중열 및 수분이동 시뮬레이션 코드

본 연구에서는 지중열 수분 이동 시뮬레이션 코드로서

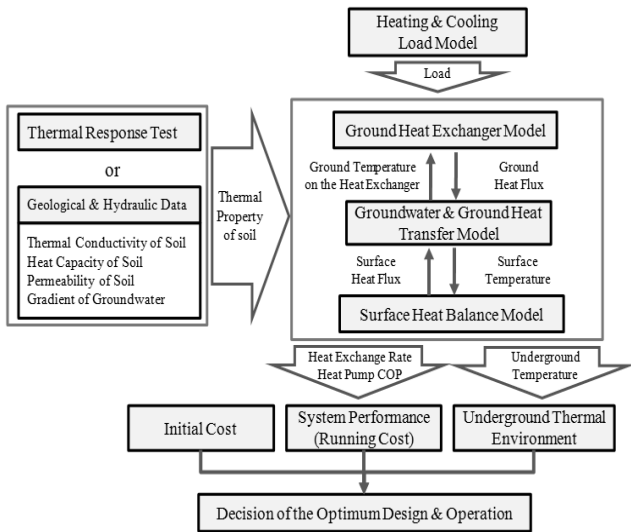


그림 3. 시뮬레이션 방법

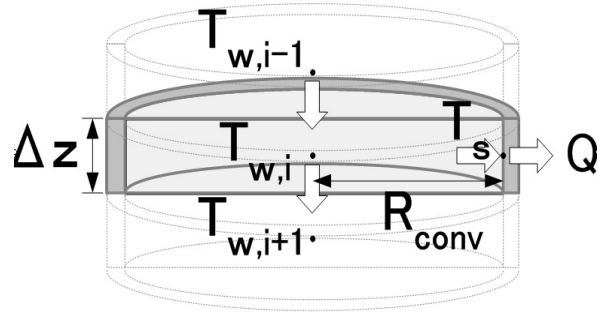


그림 4. 순환수 모델

n 은 가열에서는 0.4, 냉각에서는 0.3이다. 열교환기 표면에서 지중으로의 열플럭스는 식 (10)과 같다.

$$Q = (T_s - T_{w,i}) / (1/hA) \quad (10)$$

3.4 지표면 열수지 모델

지표면에서 토양에의 열플럭스(Q)는 지표면 열 평형식에 의해 식 (11)에 의해 계산한다.

$$Q = R_{sol} + R_{sky} - R_{surf} - H_{surf} + L_{surf} \quad (11)$$

여기서, R_{sol} , R_{sky} , R_{surf} , H_{surf} , L_{surf} 는 각각 지표면의 전일사량, 대기에서 지표면으로의 장파장 방사율, 표면에서의 장파장 방사율, 표면에서의 장파장 방사율, 현열 플럭스, 잠열 플럭스를 나타내며 다음과 같이 계산된다.

(1) 지표면의 전일사량(R_{sol})

$$R_{sol} = (1 - \alpha_s)(J_{dn} \times \sin(h) + J_{sh}) \quad (12)$$

여기서, J_{dn} 은 지표면의 직달일사량, $\sin(h)$ 는 태양고각도, J_{sh} 는 천공일사량, α_s 는 지표면의 일사반사율(albedo)이다.

(2) 대기에서 지표면으로의 장파장 방사율(R_{sky})

$$R_{sky} = \sigma(273.16 + T_a)^4(0.526 + 0.076\sqrt{f})(1 - 0.062 \times c) \quad (13)$$

여기서, f 는 지표면 부근의 공기의 수증기 분압(mmHg), c 는 운량, T_a 는 외기온도다.

(3) 표면에서의 장파장 방사율(R_{surf})

$$R_{surf} = \sigma(273.16 + T_a)^4(1 - 0.062 \times c) \quad (14)$$

(4) 현열 플럭스(H_{surf})

$$H_{surf} = \alpha_c(T_s - T_a) \quad (15)$$

WASY사에서 개발한 FEFLOW를 사용하였다. 이 코드는 지하수의 흐름이나 토양오염의 해석에 이용되는 시뮬레이션 코드로서, 지중의 열·물질이동에 관한 보존법칙으로 식 (4)~(6) (질량보존의 법칙, 운동량보존의 법칙, 에너지보존의 법칙)은 토입자, 액수, 기체의 각층에서 각각 성립한다. 에너지 보존식에서 j 는 각 상의 열확산의 전도항과 분산항으로 구성된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha) = \epsilon_\alpha \rho^\alpha Q_i^\alpha \quad (4)$$

$$v_i^\alpha + \frac{k_{ij}^\alpha}{\epsilon_\alpha \mu^\alpha} \left(\frac{\partial p^\alpha}{\partial x_i} - \rho^\alpha g_i \right) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha E^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha E^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(j_{iT}^\alpha) = \epsilon_\alpha \rho^\alpha Q_T^\alpha \quad (6)$$

3.3 지중열교환기 모델(Nam 등, 2008)

U형 관내의 순환수 온도는 1차원 이류확산 방정식인 식 (7)를 이용하여 계산한다(그림 4). 또한, 순환수에서 열교환기 내표면으로 전달되는 대류 열전달량은 식 (8)에서 계산된다

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\lambda_w}{\lambda_w \lambda_w} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - U_w \frac{\partial T_w}{\partial z} + \frac{h P_w}{\rho_w C_w A_w} (T_1 - T_w) \quad (7)$$

$$h = N \frac{\lambda_w}{r} \quad (8)$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (9)$$

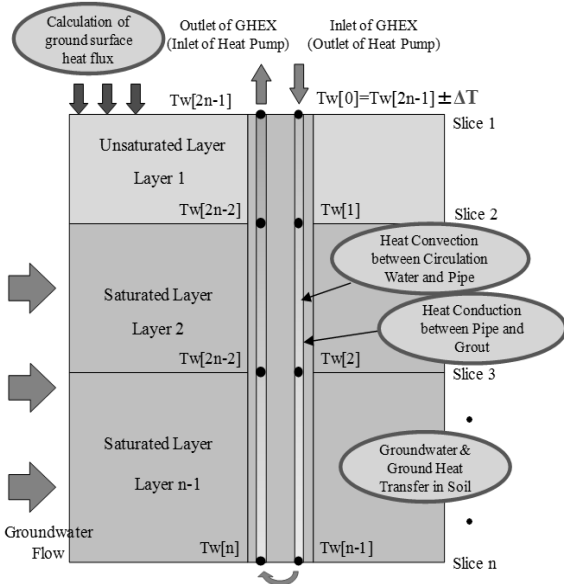


그림 5. 계산 과정



그림 6. 부속연결형 시공 형상



그림 7. 슬링키형 시공 형상

여기서, T_s 는 지표면온도를 나타낸다. 지표면의 대류 열전달률 α_c 는 유르게스(Jürges)의 실험식에 의해, 지표부근의 풍속 (v)을 이용하여 식 (16)과 같이 나타낸다.

$$\alpha_c = 5.8 + 3.9v (v \leq 5m/s), \alpha_c = 7.1v^{0.78} (v > 5m/s) \quad (16)$$

(5) 잠열 플럭스(L_{surf})

$$L_{surf} = \beta \times 7 \times \frac{133.15}{1000} \alpha_c (f_{sat}(T_s - T_a)) \quad (17)$$

여기서, β 는 지표면의 건습의 효과를 나타내는 계수, $f_{sat}(T_s)$ 는 T_s 에서의 포화수증기압이다.

그림 5는 상기 설명한 지하수 및 지중 열이동 해석코드 FEFLOW에 지중열 교환 모델, 지표면 열수지 모델을 접목한 해석수법을 나타낸 것이다.

4. 해석대상

4.1 시공법

시물레이션의 대상인 서울 순화동 현장타설말뚝형(PRD) 에너지 파일의 배관설치 및 시공상황은 다음과 같다. 그림 6 (부속연결형)은 철근 케이지의 외주에 지중열 교환파이프(PB 25A)를 26개(13쌍) 결속하여 설치하였다. 그림 7(슬링키형)은 부속연결형과 같은 길이의 열교환 파이프를 직렬로 연결한 형태이다. 본 연구에서는 부속연결형과 슬링키형 형태의 열교환기의 성능을 지중열교환량 예측 시물레이션을 통해 해석 및 평가하는 것을 목적으로 한다.

4.2 해석 모델

PRD 파일에 시공한 부속연결형의 해석모델은 그림 8과 같으며 열교환파이프는 U형관의 병렬 방식으로 시공시의 파이프 이격거리를 고려하여 성형하였다. 파일의 깊이는 시공 심도와 동일한 4.5m이며, 굴착공 내부에는 콘크리트로 충전하는 것으로 해석을 실시하였다. 본 해석을 통해 파이프내의 순환수 온도변화 및 열교환량 예측을 실시하였다.

한편, FEFLOW를 이용한 해석 모델의 영역과 메쉬 분할은 그림 9와 같으며 유한요소법(Finite Element Model, FEM)을 베이스로 한 삼각형 메쉬(Triangle Mesh)를 이용하여 지중열 교환기 및 보어홀의 형상을 구체적으로 형상화하였다. 해석 영역은 주변 열간섭의 영향을 벗어나도록, 가로12m×세로12m×깊이7m로, 지중열교환기와 파일의 깊이는 4.5m로 설정하였다. 지중열교환량 해석은 3개월간(12월, 1월, 2월)의 열교환 운전과 3개월(6월, 7월, 8월)의 방열운전으로 실시하였고, 오피스 빌딩의 운전 패턴을 고려하여 오전 9시에서 오후 6까지 하루 9시간 운전동안 일정하게 열교환하는 것으로 설정하였다.

또한, 순환수 온도의 제어는 시스템 COP 저하를 방지하기 위해 5℃~29℃를 유지하도록 난방 부하량(순환수 출입구의 온도차)을 조절하였다. 순환수의 유량은 지중열교환기 한 쌍당 3.4l/min로 파이프 한 개당 전체 유량은 44.6l/min로 설정하였다. 표 2는 본 시물레이션의 기본조건을 나타낸다.

시물레이션의 열물성치 중 지중열교환 파이프는 PB 재질

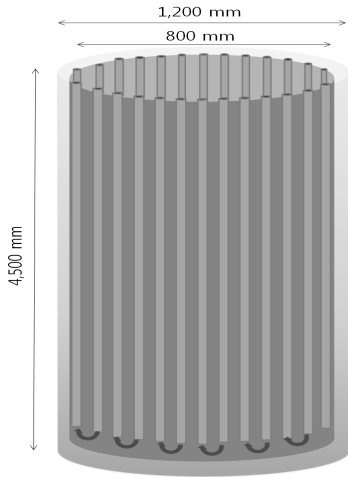


그림 8. 해석모델의 개념도

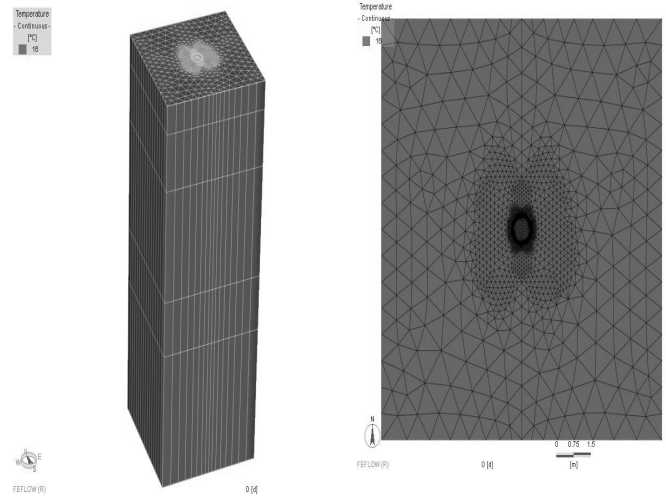


그림 9. 해석모델의 영역 및 메쉬 분할

표 2. 시뮬레이션 조건

지중열 교환 파이프	- 파이프 규격 : 단일 U형 25Am×13EA - 보아홀 직경 : $\phi 1,200$ - 그라우팅 : 콘크리트
크기	- 12m×12m×7m
히트 소스 조건	- U튜브별 유량 : 3.4l/min, ΔT 2°C - 5°C 이상에서 난방 - 29°C 이하에서 냉방
운전조건	- 난방기간 : 1/1~2/28, 12/1~12/30 - 냉방기간 : 6/1~8/30 - 일 운전시간 : 9:00~18:00
초기 온도	- 16°C

의 일반적인 열전도율 0.54W/mK로, 일반적인 토양 조건을 고려하여 지반의 열전도율 3.0W/mK, 공극율 0.3으로, 굴착 공은 콘크리트(열전도율: 1.5W/mK, 열용량 : 2.8MJ/m³K)를 충전하는 것으로 설정하였다. 지하수의 흐름은 경계조건에서 수위레벨을 일정하게 설정하여 거의 흐르지 않는 것으로 가정하여 계산하였다.

4.3 해석 결과

4.3.1 부속연결형 해석결과

그림 10과 11은 난방시와 냉방시의 파이프 1개당 단위길이당 지중열 교환량(HER) 및 열원(순환수 출구) 온도차의 일 평균 변화를 나타낸다. 전체 난방기간의 평균 열원 온도차는 0.34°C이고 평균 열교환량은 17.8W/m이다. 이때, 총 13쌍의 파이프가 설치된 파일 1개의 단위길이당 열교환량은 231.4W/m로서 일반적인 수직밀폐형 단일 U형 교환기의 단위길이당 열교환량 40~50W/m에 비해 기간 평균으로 약 5배에 대응하는 열교환량을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 여름철 냉방운전의 경우, 전체 냉방기간의 평균 열원 온도차는 0.3

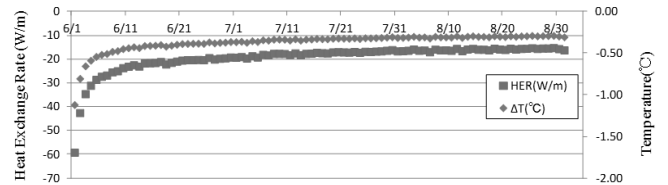


그림 10. 여름철 냉방 방열시의 일평균 열원온도차 및 지중 열교환량(부속연결형)

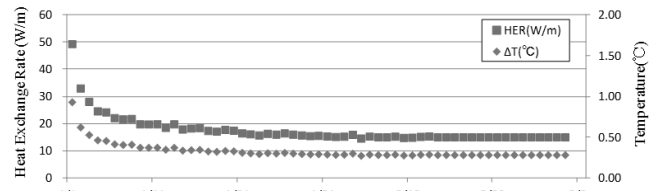


그림 11. 겨울철 난방 열교환시의 일평균 열원 온도차 및 지중 열교환량(부속연결형)

표 3. 부속연결형의 시뮬레이션 결과(연평균치)

운전기간	열원수 평균 온도차(°C)	파이프 1개 평균 채방열량(W/m)	파일 1개 평균 채방열량(W/m)
여름철 열교환	0.34	17.8	231.4
겨울철 방열	0.37	19.4	252.2

7°C였고, 19.4W/m의 평균 방열량을 얻었다. 파일 1개의 기간 평균 방열량은 252.2W/m로서 난방 열교환에 비해, 약 9% 높은 방열을 할 수 있는 것으로 나타났다. 이것은 냉방운전의 열원수 설정온도(29°C이하)의 영향과 더불어, 겨울철 열교환에 의한 지중온도 하강의 효과가 여름철 방열에 영향을 미친 것으로 보인다.

표 3은 총 13쌍의 열교환기를 병렬로 설치하는 부속연결형의 장기 시뮬레이션 결과를 종합하여 나타낸다.

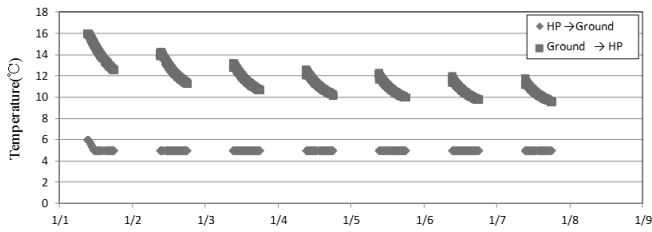


그림 12. 겨울철 난방 열교환시의 열원수 출입구 온도(슬링기형)

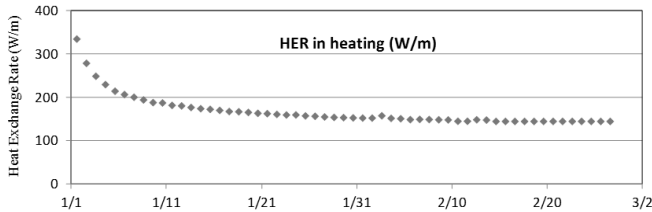


그림 13. 겨울철 난방 채열시의 일평균 지중채열량(슬링기형)

한 열교환량 예측을 실시하였다. 시공심도 4.5m, 직경 1,200mm 규격의 현장타설말뚝형 에너지 파일내부에 전체 길이 200m(PB 재질)의 열교환기를 삽입한 형상을 열교환 시물레이션을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 지중채열량은 운전시작과 함께 채열에 의한 지중온도의 저하에 의해, 점점 감소하는 경향을 보였다.
2. 부속연결형의 평균 열원수의 온도차는 난방운전에서 0.37°C, 냉방운전에서 0.34°C로 나타났다.
3. 부속연결형의 난방운전시 열교환량 231.4W/m보다 냉방운전의 방열량은 252.2W/m로 9% 높았다.
4. 슬링기형은 난방 기간 평균 열교환량이 168.0W/m로 부속연결형에 비해 약 27% 낮은 열교환량을 얻었다.
5. 결론적으로 4.5m 심도의 PRD형 에너지 파일에서 부속연결형은 약 1kW, 슬링기형은 약 756W의 채열 및 방열이 가능한 것으로 나타났다.

4.3.2 슬링기형 해석결과

슬링기형은 부속연결형의 직렬접속으로 가정하여 모델화를 실시하여, 첫 파이프의 입구 온도와 마지막 파이프의 출구 온도의 온도차로 열원수의 출입구 온도를 계산하였다. 그림 12와 13은 난방 열교환시의 열원수 온도변화 및 일평균 지중 열교환량 변화를 각각 나타낸다. 본 계산에서는 초기 온도차를 10°C로 설정하여 운전을 실시하였다. 열원수 온도의 변화에서는 일반적인 지중열교환에서 보이는 현상과 같이, 열교환이 계속됨에 따라 지중온도 변화로 인한 열원수 출구온도 하강이 현저하게 나타났으며, 그 결과, 열교환량 감소를 확인할 수 있었다.

또한 슬링기형에서는 난방기간동안 평균 6.6°C의 열교환이 발생하였고 파일 1개당 단위길이당 168.0W/m의 열교환이 가능한 것으로 나타났다. 이것은 같은 기간의 부속연결형의 단위길이당 열교환량(231.4W/m)에 비해 약 27% 적은 열교환량으로서, 결과적으로 부속연결형이 슬링기형보다 열교환량이 우수하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 현장타설말뚝형 에너지 파일(PRD)에 삽입된 부속연결형과 슬링기형을 대상으로 수치 시물레이션을 이용

향후, 보다 다양한 열교환 방식에 대한 검토와 함께, 순환수 유량 및 열교환기 배치에 관한 검토를 수행할 예정이다.

참고문헌

1. 남유진(2011), “토양 및 지하수 조건이 지열공조시스템의 성능에 미치는 영향에 관한 수치 해석적 연구”, 「대한설비공학회」, 23(5): 321~326.
2. Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger (1946), *Conduction of Heat in Solids*, Clarendon press, Oxford.
3. Eskilson, P. (1987), *Thermal Analysis of Heat Extraction Borehole*, Ph. D. Thesis, University of Lund.
4. Kavanaugh, S. P. (1985), *Simulation and Experimental Verification of Vertical Ground-coupled Heat Pump Systems*, Ph. D. Thesis, Oklahoma State University, USA.
5. Nam, Y. J., R. Ooka and S. H. Hwang (2008), “Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system”, *Energy and Buildings*, 40: 2133~2140.
6. 남유진(2009), 「地中熱地下水利用空調システムにおける最適利用手法およびポテンシャル把握法に關する研究」, 박사학위논문, 일본도쿄대학교(in Japanese).