

코일형 PHC 에너지파일의 열적 거동 및 설계법에 관한 연구

Study on Thermal Behavior and Design Method for Coil-type PHC Energy Pile

박 상 우¹ Park, Sangwoo

손 정 락² Sohn, Jeong-Rak

박 용 부³ Park, Yong-Boo

류 형 규⁴ Ryu, Hyung-Kyou

최 항 석⁵ Choi, Hangseok

Abstract

An energy pile encases heat exchange pipes to exchange thermal energy with the surrounding ground formation by circulating working fluid through the pipes. An energy pile has many advantages in terms of economic feasibility and constructability over conventional Ground Heat Exchangers (GHEXs). In this paper, a coil-type PHC energy pile was constructed in a test bed and its thermal performance was experimentally and numerically evaluated to make a preliminary design. An in-situ thermal response test (TRT) was performed on the coil-type PHC energy pile and its results were compared with the solid cylinder source model presented by Man et al. (2010). In addition, a CFD numerical analysis using FLUNET was carried out to back-analyze the thermal conductivity of the ground formation from the TRT result. To study effects of a coil pitch of the coil-type heat exchange pipe, a thermal interference between the heat exchange pipes in PHC energy piles was parametrically studied by performing the CFD numerical analysis, then the effect of the coil pitch on thermal performance and efficiency of heat exchange were evaluated. Finally, an equivalent heat exchange efficiency factor for the coil-type PHC energy pile in comparison with a common multiple U-type PHC energy pile was obtained to facilitate a preliminary design method for the coil-type PHC energy pile by adopting the PILESIM2 program.

요 지

에너지파일은 말뚝 내부에 열교환을 위한 순환파이프를 설치하여 파이프 내에 열전달 유체를 순환시킴으로써 주변 지반의 열에너지와 말뚝 간의 열교환을 가능하게 한 구조물이다. 에너지파일은 기존의 지중 열교환기와 비교하여 경제적, 시공적인 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 코일형 PHC 에너지파일을 시공하여 그 열적 거동을 실험 및 수치해석을 통하여 평가하였으며, 해당 에너지파일의 예비설계를 수행하였다. 현장 시공된 코일형 PHC 에너지파일에 대한 현장 열응답시험(thermal response test, TRT)을 실시하고, 이 결과를 Man et al.(2010)이 제안한 개선된 원통형 열원 모델(solid cylinder source model) 결과와 비교하였다. 또한 현장 열응답 시험 결과를 FLUENT를 이용한 전산유체(computational fluid dynamics, CFD) 수치해석을 통해 모사함으로써, 대상 지반의 열전도도를 역해석을 통해 산정하였다. 코일형 PHC 에너지파일에 설치된 코일형 열교환 파이프의 파이프 루프 간 간격에 따른 열간섭

1 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석박사통합 과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

2 비회원, LH 토지구택연구원 연구위원 (Senior Research Fellow, Korea Land & Housing Corporation)

3 정회원, LH 토지구택연구원 수석연구원 (Member, Research Fellow, Korea Land & Housing Corporation)

4 비회원, 대림산업 기술개발원 선임연구원 (Research Fellow, Technology Research&Development Institute, DAELIM Industrial Corporation)

5 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ., Tel: +82-3290-3326, Fax: +82-928-7656, hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

을 평가하기 위하여 코일피치에 변화를 주며 수치해석을 수행하였으며, 결과를 통해 코일피치에 따른 에너지파일의 열거동 및 열교환 효율을 평가하였다. 마지막으로 수치해석을 통해 코일형 PHC 에너지파일과 일반적인 복합 U-형 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일 간의 열교환 효율을 비교하여 코일형 PHC 에너지파일의 등가 열교환율(또는 등가 환산계수)을 제시하였고, 이를 PILESIM2를 이용한 설계 알고리즘에 적용함으로써 해당 에너지파일의 예비설계를 수행하였다.

Keywords : Coil-type PHC energy pile, Equivalent heat exchange efficiency factor, Heat exchange pipe, Solid cylinder source model, Energy pile design

1. 서론

일반적으로 지열에너지란 토양, 지하수, 지표수 등에 저장되어있는 재생 가능한 에너지로서 주로 태양 복사 열이 저장되거나, 지구 생성 시기부터 핵과 맨틀에서 확산된 마그마에 의해 지구표면으로 전달되거나, 지각에 존재하는 방사선 동위원소에 의해 발생하는 열에 의해 존재하는 에너지이며, 지표에서부터 특정 깊이에서 연중 일정한 온도를 유지한다. 지열에너지를 활용하는 측면에서 보면, 직접이용(direct use)과 간접이용(indirect use) 기술로 분류할 수 있고, 지열에너지의 직접이용 기술 중 가장 큰 부분을 차지하는 기술은 지열 열펌프 시스템(ground source heat pump(GSHP) systems) 또는 지열 히트펌프 시스템(geothermal heat pump systems)이다. 이 기술은 열펌프와 지중 열교환기(ground heat exchangers, GHEXs)를 이용하여 냉방 시에는 건물 내의 열을 지중으로 방출하고, 난방 시에는 지중의 열을 실내와 온수에 공급함으로써 하나의 통합 시스템으로 냉난방을 동시에 구현할 수 있는 기술이다. 미국 에너지부(DOE, 2001)는 지열 열펌프 시스템과 기존 화석연료를 이용한 냉난방 설비의 효율을 비교했을 때 지열 열펌프 시스템의 냉난방 성능이 가장 우수하다고 보고하였으며, 미국 환경보호청(EPA, 1993)은 지열 열펌프 시스템이 현존하는 냉난방 기술 중 가장 효율적이라고 밝혔다.

신·재생에너지의 선진국이라 할 수 있는 미국과 유럽에서는 지중열교환기의 개발이 적극적으로 진행되고 있으며 현재 안정적인 단계에 이른 밀폐형과 개방형은 물론이고 온도차 에너지의 범위에 해수, 강수 등의 열교환기가 개발되고 있다. 미국의 경우 지열 교환기 및 히트펌프에 있어서 세계 최고의 기술력과 실용화 실적을 갖고 있는 것으로 평가되고 있고 오바마 대통령의 녹색성장 정책과 맞물려 학교 및 관공서에 지열 냉난방 시스

템을 법적으로 강제함으로써 저심도 지열 에너지에 대한 실용화 연구가 활발히 진행 중이다. 미국 내에서 현재 20~30억달러가 188개 지열 사업에 투자되고 있고 2013년까지 70억달러가 추가로 투입될 것으로 전망하고 있다. EU 국가 동향은 2008년까지 이탈리아, 프랑스, 노르웨이, 핀란드, 오스트리아, 독일, 스위스 등이 연평균 15~33%의 높은 시장 확대를 보였으며 2008년 까지 GHEX's 기반 지열 교환 기술 유닛은 총 50만개 이상 시공되고 있다. 향후 EU-25개국에 평균 6% 이상의 지열 열펌프 시스템 시장의 성장이 예상되고 있으며 지열 저장/활용에 대해 EU Renewable Energy Framework를 제정하여 의무 도입 및 정부 지원하고 있다.

최근 전 세계적으로 신재생에너지 활용에 대한 관심이 높아지면서, 국내에서도 2013년 개정된 '신에너지 및 재생에너지 개발, 이용, 보급 촉진법' 등의 관련 법규를 제정하여 1,000m² 이상 규모의 신축 공공건물의 경우 예상 에너지 사용량의 11%이상을 신재생에너지를 활용하도록 하는 등, 신재생에너지 개발 및 보급에 힘쓰고 있다. 이러한 국제 및 국내 정세에 따라 지열 열펌프 시스템의 보급 및 활용은 계속 증가하고 있는 추세이다.

에너지파일이란 구조물 기초로서 시공되는 현장타설 또는 기성 콘크리트 말뚝내부에 열교환을 위한 순환 파이프를 설치하여 파이프 내에 열전달 유체(물 또는 부동액)를 순환시킴으로써 지열에너지를 얻는 방식으로, 기존 구조물 기초로 사용되는 말뚝을 이용하여 기초하부 지반 내에 존재하는 지열에너지를 건물의 기초 말뚝을 통해 활용하도록 하는 구조물이다. 따라서, 에너지파일은 기존의 말뚝 기초를 지열 냉난방 시스템으로 활용함으로써 구조적인 지지체와 지중 열교환기로서의 역할을 동시에 수행한다. 또한, 에너지파일은 수직 밀폐형 지중 열교환기의 전체 시공비에 50% 이상 차지하는 천공비를 절감하는 경제적 효과를 얻을 수 있다.

국외의 경우에는 에너지파일을 대규모 공공건물에도 적극적으로 적용하고 있으며(Pahud and Hubbuck, 2007; Nam et al., 2007), 에너지파일 성능 연구에도 많은 발전을 이루고 있는 단계에 있다(Brandl, 2006; Gao et al., 2008; Jun et al., 2009; Nam et al., 2008, 2011). 국내의 경우에는 최근 들어 에너지파일 관련 국책연구와 민간 차원의 연구가 많이 활성화 되고 있으나, 국외와 비교하여 시공 사례나 관련 연구 및 기술이 많이 부족한 실정이다. PHC말뚝을 이용한 에너지파일에 대한 국내 연구로는 Baek(2004), Nam et al.(2007), Park et al.(2007), Ryu(2008), Jeong et al.(2010), Lee(2012), Yoon et al.(2012)의 연구가 있으나, PHC 에너지파일의 성능 연구에 주된 초점이 맞춰져 있으며 실증연구 및 시공, 설계법에 대한 연구는 부재하다. 따라서 국내의 경우에는 국외의 설계법과 시공법을 그대로 답습하고 있는 상황이다.

본 연구에서는 PHC 에너지파일에 대한 열적 거동을 수치해석 및 이론 해석을 통해 분석하였으며, 이를 이용하여 PHC 에너지파일을 설계할 수 있는 방법을 제안하여 실제 현장 시공된 에너지파일에 대한 예비설계를 수행하였다. 이를 위해 현장 시공된 코일형 PHC 에너지파일에 대해 현장 열응답시험(thermal response test, TRT)을 실시하고 이 결과를 Man et al.(2010)이 제안한 개선된 원통형 열원 모델(solid cylinder source model)과 비교하여 지반의 열전도도를 유추하는 방법을 제안하였다. 또한 FLUENT를 이용한 전산유체(computational fluid dynamics, CFD) 수치해석을 수행하여 현장에서 수행된 TRT 결과를 역해석하고 코일형 PHC 에너지파일의 지반과의 열교환을 모사할 수 있는 수치해석 모델을 제시하였다. 코일형 PHC 에너지파일에 설치된 코일형 열교환 파이프의 파이프 루프 간 간격에 따른 열간섭 현상을 분석하기 위하여 코일피치에 변화를 주며 수치해석을 수행하였으며, 이를 통해 코일피치에 따른 에너지파일의 열거동 및 열교환 파이프의 열교환 효율을 평가하였다. 마지막으로 개발된 CFD 수치해석 모델을 이용하여 코일형 PHC 에너지파일과 기존의 에너지파일 시뮬레이션 프로그램(PILESIM2)를 통해 부하설계가 가능한 복합 U-형 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일 간의 열교환 효율을 비교하여 코일형 PHC 에너지파일의 동가 열교환율(동가 환산계수)을 제시하였으며, 이를 PILESIM2에 적용하여 시공현장에 대한 코일형 PHC 에너지파일 예비설계를 수행하였다.

2. 현장 열응답시험 모사

현장 열응답시험이란, 일정한 열량을 지속적으로 주입하였을 때 순환수의 온도변화를 통하여 지중열교환기의 성능을 평가하고, 대상 지반의 열적 물성치를 획득하기 위한 실험이다(Wagner and Clauser, 2005; Sharqawy et al., 2009; Lee et al., 2010). 현장 열응답시험은 서울 종로구 00 공사 현장에 시험 시공된 코일형 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일에 대하여 수행되었다. PHC 에너지파일 내부에 삽입된 열교환 파이프는 코일(혹은 나선) 형태 즉, 파이프가 코일모양으로 PHC말뚝 중공에 삽입되는 형상으로 설치되었다. 시공된 에너지파일의 제원 및 단면은 Table 1에 나타났다.

본 논문에서는 수행된 현장 열응답시험을 모사하여 에너지파일의 열적 거동을 분석하고, 주변 지반의 열적 물성치를 예측하기 위하여 이론 모델을 이용하는 방법과 수치해석을 이용하는 방법을 적용하였다. 이론 모델로는 PHC 에너지파일 형상 특성에 적합하도록 Man et al.(2010)이 제안한 유한 길이의 말뚝 내부의 열용량을 고려할 수 있는 개선된 원통형 열원 모델(solid cylinder source model)을 적용하였으며, FLUENT 프로그램을 이용하여 CFD 수치해석을 활용한 역해석 방법을 도입하였다.

2.1 개선된 원통형 열원 모델(Solid cylinder source model)

현장 열응답시험을 통하여 획득한 데이터를 분석하거나 에너지파일의 열교환 특성을 예측하기 위하여 Carslaw and Jaeger(1959)가 제안한 선형 열원 모델(line source model), Ingersoll et al.(1954)과 Kavanaugh and Rafferty(1997)이 제안한 중공 원통형 열원 모델(hollow cylinder source model) 등을 적용할 수 있다. 위와 같은 에너지파

Table 1. Configuration of PHC energy pile and heat exchange pipe

PHC energy pile	External diameter (mm)	400
	Internal diameter (mm)	245
	Total length (m)	10
Coil-type heat exchange pipe	External diameter (mm)	20
	Internal diameter (mm)	16
	Coil pitch (mm)	50
	Coil radius (mm)	240
	Total length (m)	196

일의 기하학적 형상을 단순화한 이론모델들을 현장 열응답시험 결과를 역해석하는데 활용하여 대상지반의 열물성치를 획득하거나 지중열교환기의 성능을 간접적으로 평가할 수 있다.

수직 밀폐형 지중열교환기의 경우에는 보어홀 직경에 비하여 열교환기 길이가 매우 길기 때문에 이를 무한 길이의 선형이나 원통형으로 보는 선형 열원 모델이나 무한 길이의 원통형 열원 모델을 이용하여 열응답 시험 결과를 분석한다. 그러나 에너지파일은 수직 밀폐형 지중열교환기에 비해 상대적으로 길이가 짧은 원통 형태이므로 선형 열원 모델과 기존의 원통형 열원 모델을 적용하여 열응답 시험결과를 해석할 수 없고, Man et al.(2010)이 제안한 말뚝 내부의 열용량을 고려할 수 있는 유한 길이의 원통형 열원으로 개선된 원통형 열원 모델(solid cylinder source model)을 적용할 수 있다(Lee, 2012). 특히 에너지파일에 적용된 열교환기 형태가 코일형 열교환 파이프인 경우에는 Cui et al.(2011)에 의해 제안된 링-코일 열원 모델(ring-coil source model)이 보다 신뢰성 있는 해석을 가능하도록 한다. 하지만 본 현장에 시공된 PHC 에너지파일의 열교환 파이프는 코일 간의 피치간격이 0.05m로 매우 조밀하다. 따라서 에너지파일을 하나의 원통형으로 가정할 수 있다고 판단되어 본 연구에서는 Man et al.(2010)에 의해 개선된 원통형 열원 모델을 이용하여 열응답시험에 대한 분석을 수행하였다.

초기 원통형 열원 모델은 열원의 형상을 선형이 아닌 원통 형상으로 가정하여 Ingersoll et al.(1954)이 원통 내부의 열용량을 고려하지 않는 조건에 대해 다음과 같은 이론해를 제시하였다.

$$v = \frac{q}{k} G(z,p) \quad \begin{cases} z = \frac{kt}{r^2} \\ p = \frac{r}{r_0} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, v 는 온도를 나타내고 t 는 시간, k 는 열전도도, r 는 반경방향 거리, r_0 는 실린더 반경이며, Ingersoll et al.(1954)이 제시한 $G(z,p)$ 는 원통형 열원 함수로 아래와 같이 나타낸다.

$$G(z,p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty f(\beta) d\beta \quad (2)$$

$$f(\beta) = (e^{-\beta^2 z} - 1) \frac{[J_0(p\beta) Y_1(\beta) - Y_0(p\beta) J_1(\beta)]}{\beta^2 [J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)]} \quad (3)$$

여기서, J_0, J_1, Y_0, Y_1 은 각각 1종과 2종의 Bessel 함수이다.

이후, Man et al.(2010)은 수직 밀폐형 지중열교환기에 비해 상대적으로 굵고 길이가 짧은 에너지파일의 말뚝 내부의 열용량을 고려하기 위해 기존 중공 원통형 열원 모델을 개선하여 다음과 같은 이론식을 제시하였다.

$$v = \frac{q}{\rho c} \int_0^t \int_0^h \frac{1}{8[\sqrt{\pi\alpha(t-t')}]^3} I_0\left[\frac{rr_0}{2\alpha(t-t')}\right] \cdot \exp\left[-\frac{r^2+r_0^2+(z'-z)^2}{4\alpha(t-t')}\right] - \exp\left[-\frac{r^2+r_0^2+(z'+z)^2}{4\alpha(t-t')}\right] dz' dt' \quad (4)$$

$$I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(x \cos \varphi) d\varphi \quad (5)$$

여기서, I_0 는 수정 Bessel 함수, α 는 열확산계수, h 는 말뚝 길이, φ 는 angular coordinate, ρ 는 단위중량, c 는 비열이다.

Fig. 1은 Man et al.(2010)이 제시한 개선된 원통형 열원 모델을 적용한 결과와 현장 열응답시험시 측정된 온

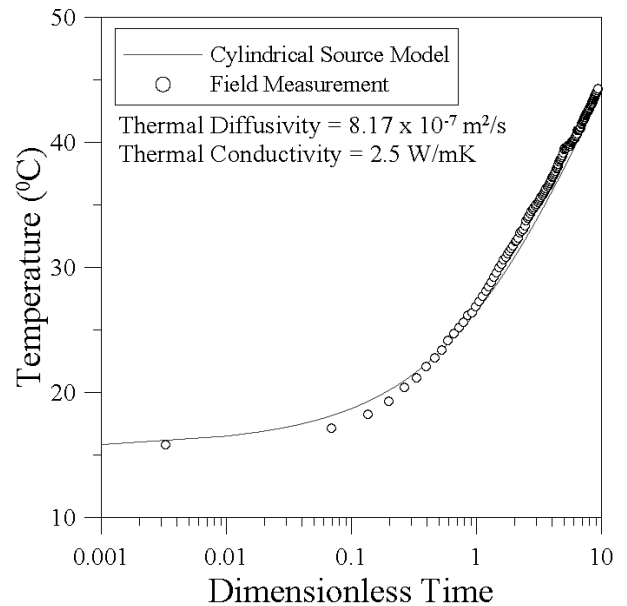


Fig. 1. Comparison of in-situ TRT and solid cylinder source model (Thermal conductivity of ground = 2.5 W/mK)

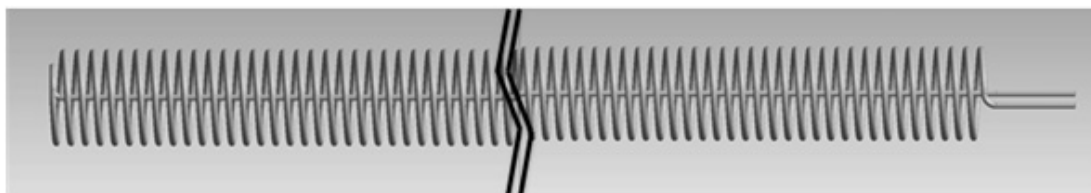
도(유출수와 유입수 평균온도) 변화의 비교를 보여준다. 개선된 원통형 열원 모델에서는 반경방향으로는 PHC 에너지파일 내경($r=r_0=0.1225\text{m}$) 즉, 열교환 파이프 코일 루프가 PHC말뚝 중공의 내면과 맞닿는 위치에서, 수직으로는 에너지파일 두부로부터 5m 아래 위치에서 시간에 따른 온도를 산정하였다. 시공된 PHC 에너지파일에서 수행한 현장 열응답 시험결과와 일치하도록 지반의 열전도도를 변화시키면서 역해석을 수행한 결과, 열응답 시험결과와 유사한 시간-온도 관계(Fig. 1)는 지반의 열전도도가 2.5W/mK (열확산계수는 $8.170 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$)인 경우에 얻을 수 있었다. 현장 열응답 시험결과를 Man et al.(2010)의 개선된 원통형 열원 모델을 통해 역해석한 지반의 열전도도(2.5W/mK)는 지반의 불균질성을 포함한 PHC 에너지파일 시공깊이(10m) 내의 대푯값으로 볼 수 있다. 일반적으로 현장에서 채취한 비교란시료를 이용하여 실내 열전도도 시험을 수행하는 것이 지반의 열전도도를 산정하기 위해 가장 좋은 방법이지만, 지반의 불균질성에 따른 비교란시료의 채취 빈도와 채취 위치 등 대표 시료 선정에 문제가 있어 본 연구에서 제안한 역해석을 통해 에너지파일이 시공된 지반의 대표 열전도도를 산정하는 방법이 합리적이라고 사료된다. 본 논문에서 역해석을 통해 산정한 지반의 열전도도(2.5W/mK)는 Salomone and Marlowe(1993)이 함수비 및 단위중량 등을 고려해 제시한 토양 및 암석의 열전도

도 범위(모래 및 점토는 $1.5 \sim 2.6\text{W/mK}$, 암석은 $2.0 \sim 5.5\text{W/mK}$)내에 있다. 단, Man et al.(2010)이 제시한 개선된 원통형 열원 모델에서는 열원 이외에 모든 부분이 동질의 재료로 가정하므로, 본 논문에서 산정된 지반의 열전도도는 열교환 파이프가 차지하는 부분을 열원으로 두고 나머지 부분(PHC말뚝과 뒤채움재)을 모두 지반으로 가정한 결과이다.

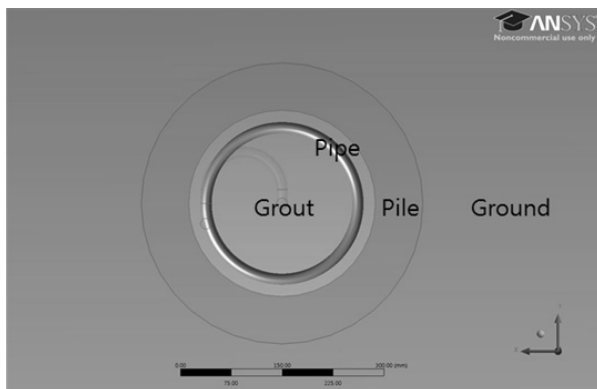
2.2 전산유체(CFD) 수치해석

수치해석을 통한 현장 열응답시험 모사를 위해 CFD 수치해석 프로그램인 FLUENT를 적용하였다. FLUENT 프로그램은 순환하는 유체의 흐름에 따른 열전달 거동 해석 및 열전달과 유체의 흐름간의 연계 해석이 가능한 유한체적해석(finite volume method) 프로그램이다.

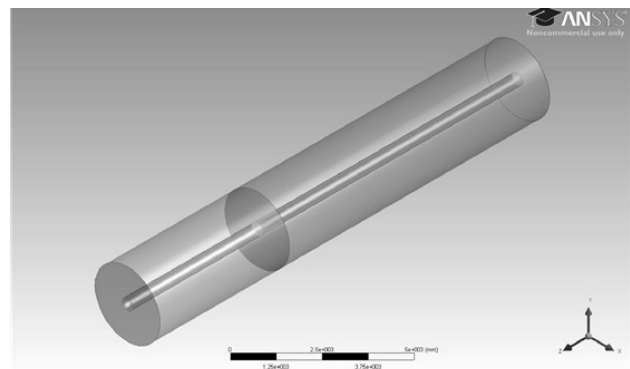
CFD 수치해석을 위한 모델링은 Table 1에 나타난 현장에 실제 시공된 PHC 에너지파일 제원과 동일하게 적용하였다. 다만, 본 현장 시공시에는 PHC말뚝 중공면과 코일형 열교환 파이프 간격이 3mm 정도로 거의 밀착하도록 설계하였으나, 코일형 열교환 파이프의 연성과 현장에서의 밀착시공의 어려움을 고려하여 코일형 열교환 파이프가 PHC말뚝 중공면에 20mm 이격된 조건을 적용하였다. 또한 코일 피치간격을 산정하여 시공된 열교환 파이프 길이는 동일하게 해석에 적용하였다.



(a) Coil-type model of heat exchange pipe

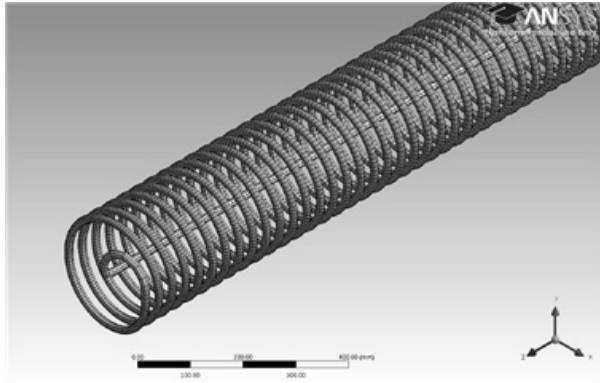


(b) Cross section of PHC energy pile model

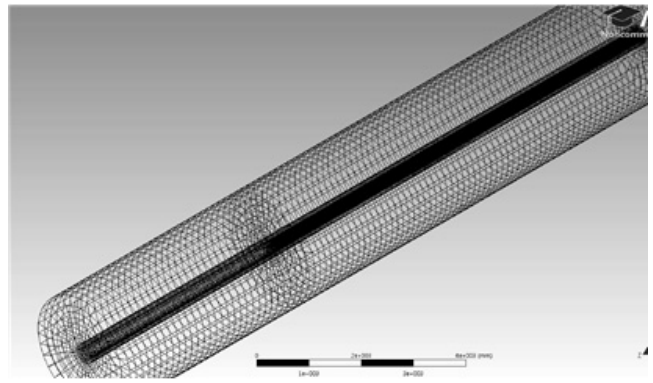


(c) Overall view of PHC energy pile

Fig. 2. 3D numerical model of coil-type PHC energy pile (FLUENT)



(a) Mesh configuration of heat exchange pipe



(b) Mesh configuration of PHC energy pile

Fig. 3. Configuration of numerical modeling for coil-type PHC energy pile

Table 2. Material properties of energy pile components

	Ground	Pile	Grout	Pipe
Density (kg/m ³)	2600	1780	2200	1000
Specific heat (J/kg·K)	2500	700	900	600
Thermal conductivity (W/m·K)	3.0	2.3	2.5	0.5

PHC말뚝 중공내에 열교환 파이프를 제외한 부분은 시멘트 그라우트로 뒤채움된 것으로 모델링하였다. 또한 순환수가 열교환 파이프를 통해 순환하면서 열이 파이프, 그라우트, 에너지파일을 통해 전달됨으로써 지중으로 열을 방출 및 흡수할 수 있도록 모델링하였다 (Yavuzturk et al., 1999). 모델링된 PHC 에너지파일의 형상과 적용 물성치는 Fig. 2와 Table 2에 각각 나타났다. 해석에 적용한 물성치는 현장에 대해 수행된 실내 시험 결과와 engineering tool box(2005)에서 제시한 각 구성재료의 물성치를 참고하였다. 수치해석 모델의 3차원 격자는 Fig. 3과 같이 격자의 정밀도를 높이기 위하여 hex-dominant 방법을 적용하여 구현하였다.

앞 절에서 언급한 현장 열응답 시험결과를 Man et al. (2010)이 제시한 개선된 원통형 열원 모델을 통해 역해석하는 과정과 동일하게 지반의 열전도도를 2.0~3.5W/mK 범위에서 변화시키며 CFD 수치해석을 수행한 후, 수치해석 결과가 현장 열응답 시험결과와 가장 잘 일치하도록 하는 지반의 열전도도를 본 시험 대상 지반의 대표 열전도도로 산정하였다.

현장 열응답시험에서는 일정 열량을 순환수에 지속적으로 공급하기 때문에 순환 유량과 열응답시험기에 투입된 전력량에 따라 유입수 온도의 지속적인 상승이 발생한다. 따라서 수치해석을 통해 현장 열응답시험

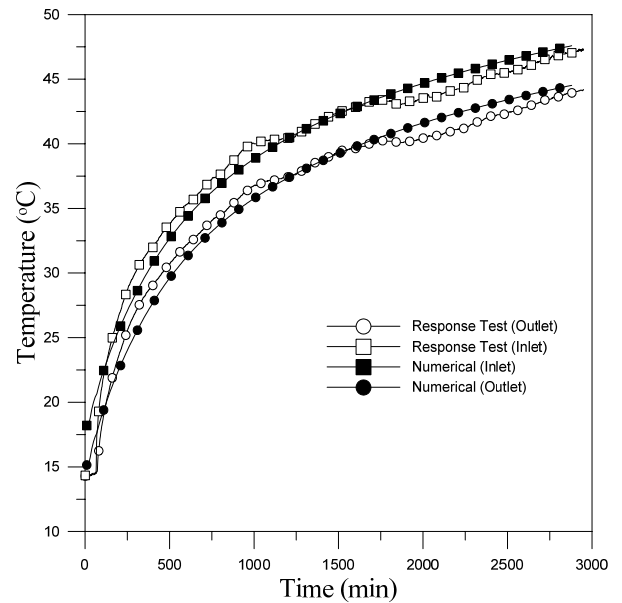


Fig. 4. Comparison of in-situ TRT and CFD numerical analysis (Thermal conductivity of ground = 3.0 W/mK)

과정을 모사하기 위해서 PHC 에너지파일에서 유출되어 열응답시험기 내부의 히터를 통과한 유출수의 온도 (T_{outlet})를 ΔT (전력량에 따라 설정)만큼 지속적으로 증가시키도록 FLUENT 프로그램에서 제공하는 UDF(user define function)을 구성하여 PHC 에너지파일로 유입되는 유입수 온도(T_{inlet})를 산정하고, 이를 유입구에 경계조건으로 적용하였다. PHC 에너지파일의 유출부는 outlet 경계면으로 적용하고 시간에 따른 온도변화를 산정하였다.

CFD 수치해석에서 계산된 순환수의 유입 온도와 유출온도를 현장 열응답 시험결과와 비교하여 Fig. 4에 나타났다. 또한, 해석 48시간 후(현장 열응답시험이 종료된 시점) 해석단면의 온도 분포를 Fig. 5에 나타냈다. 해

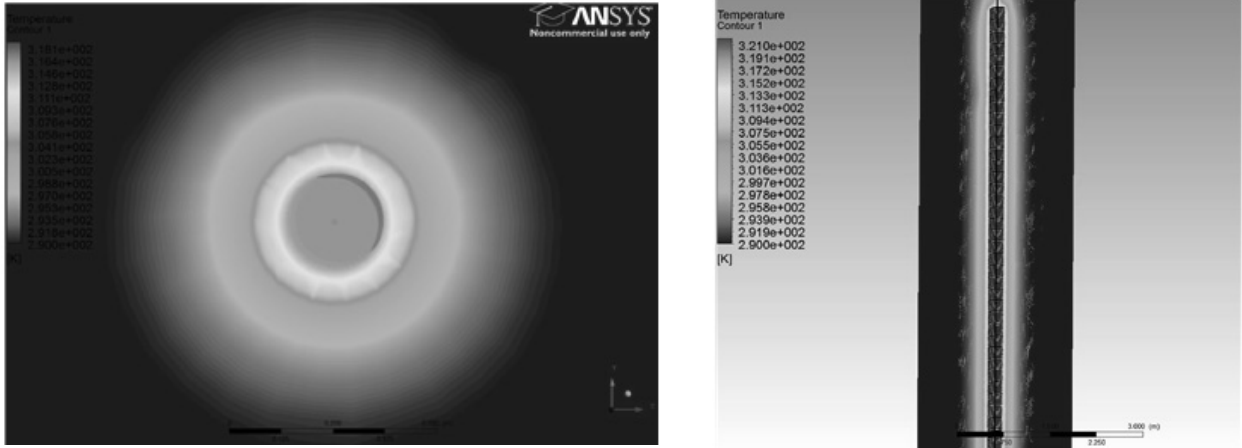


Fig. 5. Temperature distribution after 48 hours of analysis

석 결과, 현장 열응답 시험결과와 유사한 시간-온도 관계는 지반의 열전도도가 3.0W/mK인 조건에 대한 수치 해석 결과에서 얻을 수 있었다. 수치해석 모델로 역해석을 통해 산정한 지반의 열전도도 값은 앞 절에서 Man et al.(2010)이 제시한 개선된 원통형 열원 모델로부터 역해석한 지반의 열전도도인 2.5W/mK보다 다소 큰 값이다. 이러한 차이는 개선된 원통형 열원 모델에서는 본 현장에 코일형태로 시공된 열교환파이프를 하나의 원통형 열원으로 가정하고 열교환 파이프가 차지하는 부분을 열원으로 두고 나머지 부분을 모두 지반으로 가정하였기 때문이다. 반면에 FLUENT를 이용한 CFD 수치 해석에서는 현장에 시공된 PHC 에너지파이프를 동일하게 모델링하여 순환수의 열이 파이프, 뒤채움재, 파이프를 통해 지반으로 전달되는 것으로 상세히 모사되었다.

3. 코일형 열교환 파이프 피치간격에 따른 효율 비교

일반적으로 동일한 근입 깊이의 에너지파이프에서 열교환량은 설치된 열교환 파이프의 길이가 길어질수록 증가하는 것으로 알려져 있다. 그러나 PHC말뚝 증공에 열교환 파이프가 코일(나선) 형태로 시공된 경우에는 그 길이가 길어질수록 피치간격이 작아져 인접 파이프 루프 간 열간섭이 발생하기 때문에 에너지파이프의 열교환 능력은 열교환 파이프 길이에 단순 비례하여 증가하지 않는다. 따라서, 본 논문에서는 동일한 에너지파이프 형상에 대해 각각 열교환 파이프 길이가 각각 200m(피치간격 40mm), 150m(피치간격 54mm), 100m(피치간격 79mm), 50m(피치간격 160mm)로 모사된 PHC 에너지

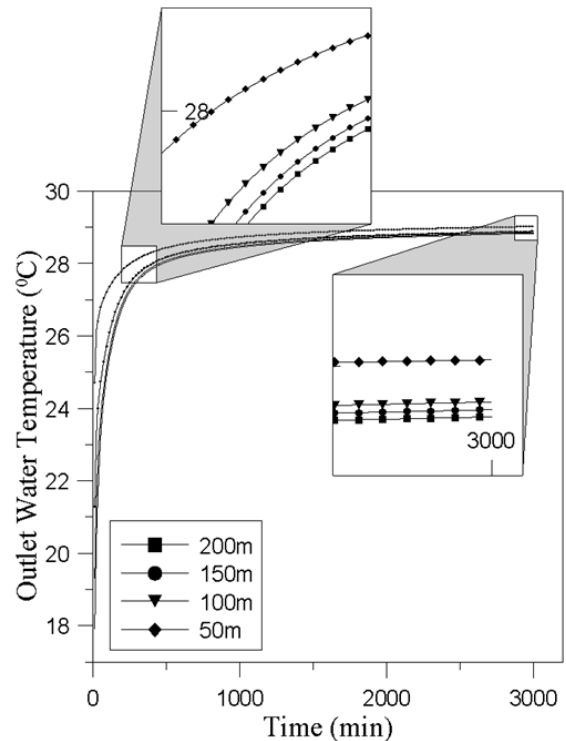


Fig. 6. Change in Outlet fluid temperature for different coil pitches (cooling operation for 50 hours)

파이프의 수치모델에 대해 50시간 연속 냉방모드에 대한 수치해석을 수행하여 열교환 파이프의 길이와 피치간격에 따른 열교환 효율을 비교하였다.

각 에너지파이프 형상별 열교환 효율을 비교하기 위하여 FLUENT 프로그램을 적용한 수치해석을 수행하였다. 수치모델의 경계조건 및 기본 물성치 입력을 위해 지반의 초기 온도를 14°C, 순환수의 질량유속을 0.201kg/s, 에너지파이프 내부로 들어오는 유입수의 온도를 30°C(냉방모드)로 유지시켜 50시간 연속 냉방가동으로 인해 측정

되는 유출수 온도 변화를 분석하였다. 해석에 사용된 지반, PHC말뚝, 열교환 파이프의 물성치 및 제원은 앞에서 열응답 시험결과를 역해석하기 위한 수치해석에 적용한 물성치 및 제원과 동일하다(Table 2).

50시간 연속 냉방운전에 대한 수치해석을 수행하여 시간에 따른 열교환 파이프 길이별 에너지파일의 유출수 온도변화를 Fig. 6에 나타냈다.

해석 결과, 수치해석에 적용한 열교환 파이프 길이는 50m씩 선형적으로 증가하나, 에너지파일 유출수의 온도 차이는 파이프 루프간 열간섭에 의해서 선형적으로 증가하지는 않는 것으로 나타났다. 특히, 열교환 파이프 길이가 50m(피치간격 160mm)와 100m(피치간격 79mm) 사이의 유출수 온도 차는 다른 경우에 비해 상대적으로 크게 나타났지만, 열교환 파이프 길이가 100m(피치간격 79mm)와 150m(피치간격 54mm), 200m(피치간격 40mm) 사이의 유출수 온도는 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 6의 확대한 부분). Fig. 7은 열교환 파이프 길이가 50m(피치간격 160mm)와 100m(피치간격 79mm), 100m(피치간격 79mm)와 150m(피치간격 54mm), 150m(피치간격 54mm)와 200m(피치간격 40mm) 사이의 시간별 유출수 온도 차를 보여준다. 각각의 열교환 파이프 길이 차이는 50m로 동일하지만 열교환 파이프 길이가 길어질수록(즉, 파이프 루프간 피치간격이 작아질수록) 열간섭 효과가 커져 유출수의 온도 차가 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히, 열교환 파이프 길이 50m와 100m, 즉, 파

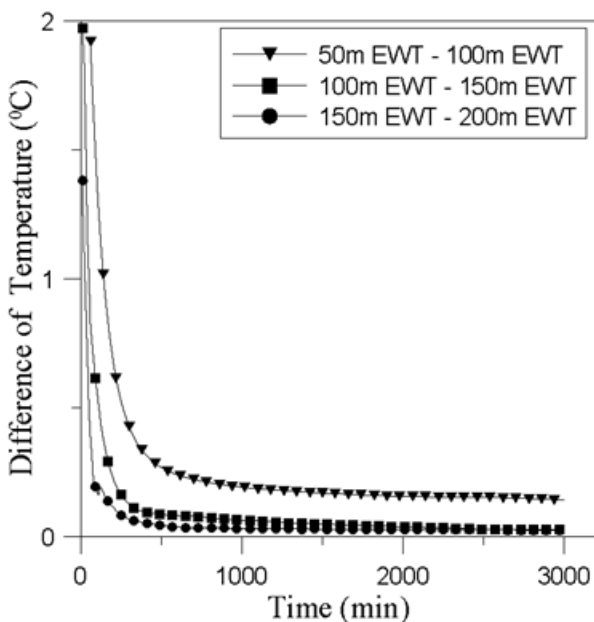


Fig. 7. Difference of outlet fluid temperature for each coil pitch

이프 루프의 피치간격 160mm와 79mm 사이의 유출수 온도차는 시간에 따라 점점 줄어들다가 50시간 기준으로 어느 정도 유지됨을 볼 수 있으나, 열교환 파이프 길이가 100m 이상에서는 시간에 따른 유출수 온도차이가 미미하다.

열교환 파이프 길이가 100m(피치간격 79mm)인 경우 50m(피치간격 160mm)에 비해 열교환량이 큰 폭으로 상승하나, 열교환 파이프 길이가 100m(피치간격 79mm) 이상, 즉 150m(피치간격 54mm)와 200m(피치간격 40mm)에서는 인접 파이프 루프 간 열간섭 효과가 증가하여 열교환 파이프 길이 증가에 따른 열교환 효율 증가가 저하되고, 열교환량 역시 충분히 증가되지 않을 것이라 예측할 수 있다.

시간에 따른 열교환 파이프의 유출수 온도 변화로부터 PHC 에너지파일의 열교환량을 산정할 수 있다. PHC 에너지파일로 유입되는 유입수의 온도(T_{in})가 일정하게 유지될 때(즉, 30°C), 식 (6)과 같이 지반으로 전달되는 열량(Q)은 에너지파일을 순환하는 유입수 온도(T_{in})와 해석된 유출수 온도(T_{out})의 차와 순환유체의 질량유속(\dot{m})과 비열(C)의 곱으로 표현할 수 있다.

$$Q = C \dot{m} \Delta T = C \dot{m} (T_{in} - T_{out}) \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 시간에 따른 각 에너지파일(열교환 파이프 길이별)의 열교환률(heat exchange rate) 변화를 산정하여 Fig. 8에 나타냈다. Table 3에는 50시간 동안

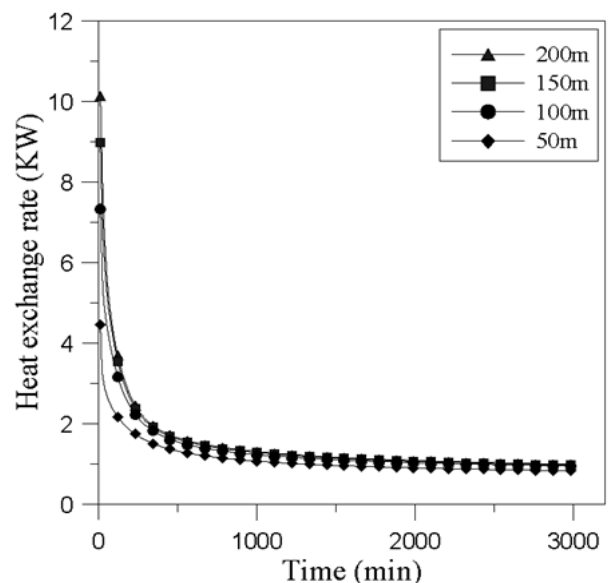


Fig. 8. Heat exchange rate for different coil pitches

Table 3. Comparison of total heat exchange

	50 m pipe length	100 m pipe length	150 m pipe length	200 m pipe length
Coil pitch (mm)	160	79	54	40
Difference of temperature (°C)	0.81	1.53	1.63	1.68
Mass velocity of fluid (kg/s)	0.20	0.20	0.20	0.20
Total heat exchange (kW·h)	53.98	73.76	78.06	80.47
Relative heat exchange	1.00	1.37	1.45	1.49
Total heat exchange per pile length (kW·h/m)	5.40	7.38	7.81	8.05
Total heat exchange per pipe length (kW·h/m)	1.08	0.74	0.52	0.40

발생한 총 열교환량을 비교하여 요약하였다. 즉 200m (피치간격 40mm) 길이의 열교환 파이프가 설치된 에너지파일의 50시간 총 열교환량은 80.47kW·h, 150m(피치간격 54mm) 길이의 열교환 파이프가 설치된 에너지파일은 78.06kW·h, 100m(피치간격 79mm) 길이의 열교환 파이프가 설치된 에너지파일은 73.76kW·h, 50m(피치간격 160mm) 길이의 열교환 파이프가 설치된 에너지파일은 53.98kW·h로 산정되었다. Table 3에 제시한 각 열교환 파이프 길이 비와 총 열교환량의 비를 비교한 결과, 길이의 증가 정도에 비해 총 교환 열량의 상승 폭은 상대적으로 작다는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 9는 다른 열교환 파이프 길이를 갖는 에너지파일의 총 교환 열량(50시간 연속 냉방가동 시)과 이를 열교환 파이프 길이로 정규화한, 즉 열교환 파이프 길이당 총 교환 열량, 즉 열교환 파이프의 열교환 효율을 비교하여 보여준다. 열교환 파이프가 길어질수록 즉, 파이프 간 피치간격이 줄어들수록 총 교환 열량은 증가하였으나 증가 기울기는 점점 감소하며, 특히, 열교환 파이프 길이당 총 교환 열량은 감소한다. 즉, 인접 열교환 파이프 루프간의 열간섭 효과에 의한 열교환 파이프의 열교환 효율 저하가 발생하며, 이로 인해 총 교환 열량도 150m(피치간격 54mm)와 200m(피치간격 40mm)에서는 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9에서 비교된 결과로 부터 본 논문에서 고려된 지반조건과 10m 근입깊이의 PHC 에너지파일에서 최적의 열교환 파이프 길이는 대략 100m(피치간격 79mm)임을 알 수 있다. 물론, 열교환 파이프 재료비를 포함한 경제성 평가와 파이프 길이가 긴(즉, 피치간격이 작은) 경우 야기되는 시공성 문제는 본 해석에서 고려하지 않았다. 최적 열교환 파이프 길이(피치간격)는 에너지파일이 시공되는 지반의 조건 및 에너지파일의 구조적 물리적 특성에 의해 변할 수 있고 이는 에너지파일 설계 시 목표로 하는 설계 부하량 외에도 시공성 및 경제성을

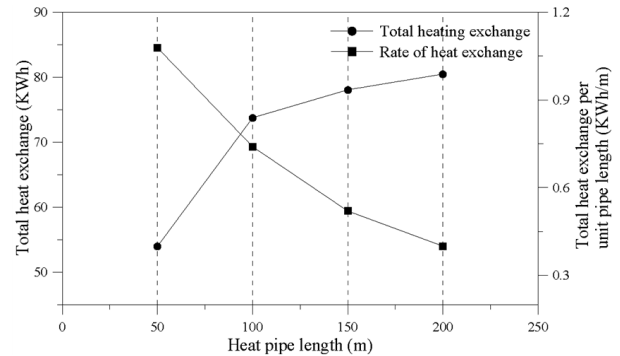


Fig. 9. Amount of total heat exchange and heat exchange per pipe length

모두 만족시킬 수 있는 적정 피치간격의 설계가 매우 중요하다는 것을 시사한다.

4. PHC 에너지파일 예비설계

PHC 에너지파일의 예비설계는 PILESIM2 프로그램을 통해 수행하였다. PILESIM2는 Pahud and Hubuck (2007)이 스위스 쥐리히 공항에 설치된 총 360본의 현장 타설 말뚝에서 2004년 10월부터 2년간 에너지파일내 순환수의 온도변화를 관측하고 시스템 성능평가를 통해 검증한 시뮬레이션 프로그램으로, 에너지파일의 직경, 길이, 개수, 간격 등의 파일 조건과 지반의 열전도도, 지하수 조건, 지하수 흐름(유속) 등의 지반 조건에 대해 최대 50년까지의 냉/난방 모사가 가능한 프로그램이다. 그러나 PILESIM2에서 적용할 수 있는 에너지파일의 열교환 파이프 형상은 복합 U-형(1쌍~5쌍 병렬연결)과 이중관형에만 한정되어 있어, 본 연구에서 고려하고 있는 코일형 등과 같은 다양한 형상의 열교환 파이프가 설치된 에너지파일 설계에는 제한이 있다. 따라서 본 논문에서는 개발된 CFD 수치해석 모델을 이용하여 코일형 PHC 에너지파일과 PILESIM2로 설계가 가능한 복합 U형 PHC 에너지파일의 열교환 효율을 비교하여 등가

열교환율(등가 환산계수)을 산정하고, 이를 PILESIM2 설계 알고리즘에 적용하여 최종 부하량을 예측할 수 있는 설계법을 제안하였다(민선홍, 2011). 또한, 제안된 설계법을 이용하여 현장에 시험시공된 PHC 에너지파일에 대한 예비설계를 수행하였다.

4.1 에너지파일 열교환 파이프 형상별 등가 환산계수 산정

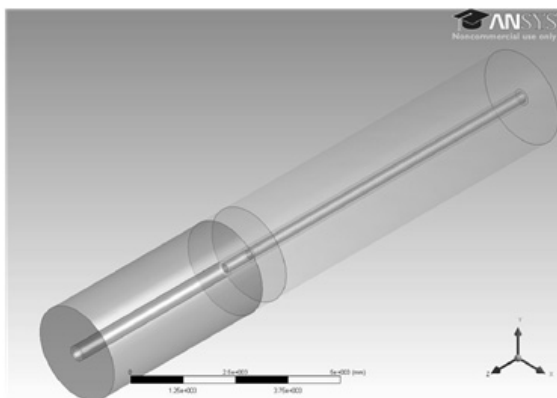
코일형 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일은 앞 절에서 검증된 수치해석 모델을 적용하였고, 복합 U형 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일은 단순 U형 열교환 파이프 2쌍을 삽입하여 2개의 유입구와 유출구가 지상에서 연결되는 병렬형태로 모델링하였다. 일반적으로 열교환 파이프가 설치된 위치에 따라 즉, 열교환 파이프와 파일 내경과의 이격거리에 따라 에너지파일의 열저항이 변하며, 변화된 열저항에 따라 열교환 효율 또한 변하게 된다. 따라서 복합 U형 PHC 에너지파일의 열교환 파이프 시공위치는 코일형 PHC 에너지파일과 동일하게 열교환 파이프를 PHC말뚝 중공면과 20mm 이격시켜 모델링하였다.

복합 U형 열교환기가 삽입된 PHC 에너지파일은 코일형 PHC 에너지파일과 동일한 재원으로 10m의 파일 길이에 내경(중공)과 외경은 각각 245mm, 400mm로 모사하였고, 열교환 파이프는 내경 16mm, 외경 20mm로 모사하였다. 두 PHC 에너지파일의 차이점은 코일형 열교환 파이프의 총 길이는 196m인 반면에 복합 U형 열교환 파이프의 총 길이는 40m로 코일형이 복합 U형 보다 약 5배 길다는 점이다. 복합 U형 열교환 파이프가

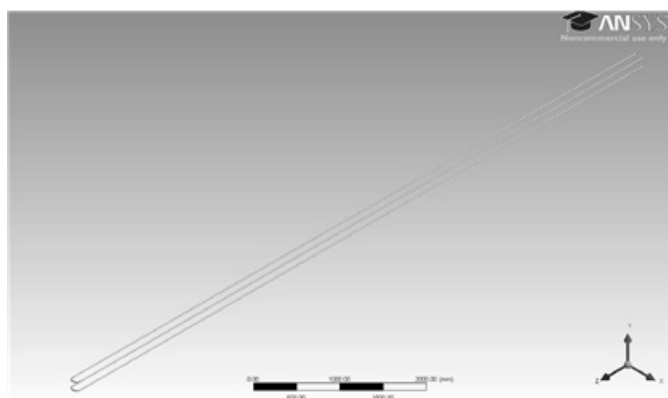
삽입된 PHC 에너지파일 수치해석 모델 형상은 Fig. 10에 나타났다.

등가 환산계수 산정을 위한 상대 열교환 효율평가는 지반의 초기온도를 14°C, 순환수의 질량유속을 0.217kg/s, 에너지파일 내부로 들어오는 유입수의 온도를 30°C(냉방모드)로 가정하여 100시간 동안 연속 냉방을 통해 평가하였다. 열교환 파이프 형태별 상대 열교환 능력을 평가하기 위해서는 실제 상업용건물의 냉방 혹은 난방 운영 일정(예를 들어, 8시간 운전-16시간 정지)을 적용하여 해석하는 것이 좀 더 합리적이거나, 본 논문에서는 일일 8시간 가동을 전제로 약 14일간(총 112시간)에 근접한 100시간의 연속 가동을 모사하여 에너지파일과 지반의 중장기 열교환 성능을 평가하고자 하였다. 즉, 냉난방 정지 기간 동안에 발생할 수 있는 에너지파일과 지반의 열적 회복능력은 고려하지 않았다.

코일형과 복합 U형 PHC 에너지파일의 유출수 온도 변화는 Fig. 11에 나타났다. 냉방 가동 초기에는 코일형 PHC 에너지파일의 유출수가 복합 U형에 비하여 3~4°C 정도 낮았다. 이 결과는 코일형 열교환 파이프 총 길이와 열교환 면적이 복합 U형에 비해 5배 정도 크기 때문에, 코일형 PHC 에너지파일의 초기 열교환 능력이 복합 U형 PHC 에너지파일 보다 우수함을 보여준다. 하지만, 냉방 가동이 지속될수록 두 PHC 에너지파일 유출수 온도차는 계속 감소하는 경향을 보였는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 코일형 PHC 에너지파일의 열교환 파이프 간의 피치 간격이 약 0.05m로 매우 작아 인접 파이프 루프 간 열간섭이 발생하여 시간이 경과할수록 복합 U형과 비교하여 열교환 효율 우위가 감소하기 때문으로 유추할 수 있다.



(a) Modeling form of PHC energy pile



(b) Multiple U-type heat exchange pipe

Fig. 10. 3D numerical model of multiple U-type PHC energy pile (FLUENT)

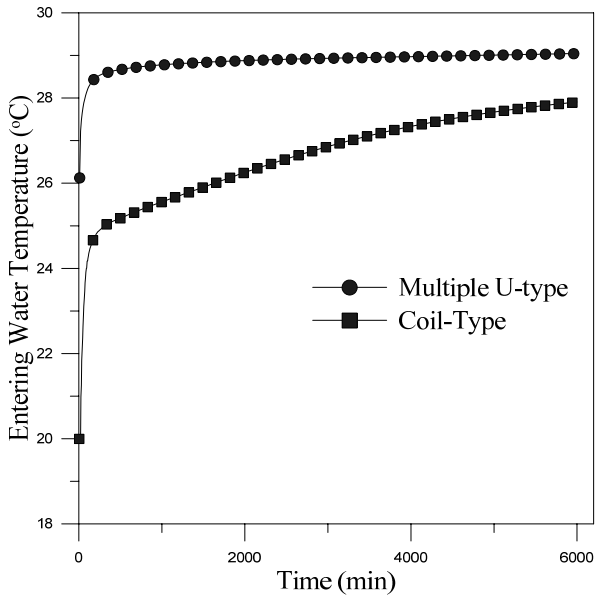


Fig. 11. Change in outlet fluid temperature for different pipe configurations (continuous cooling operation for 100 hours)

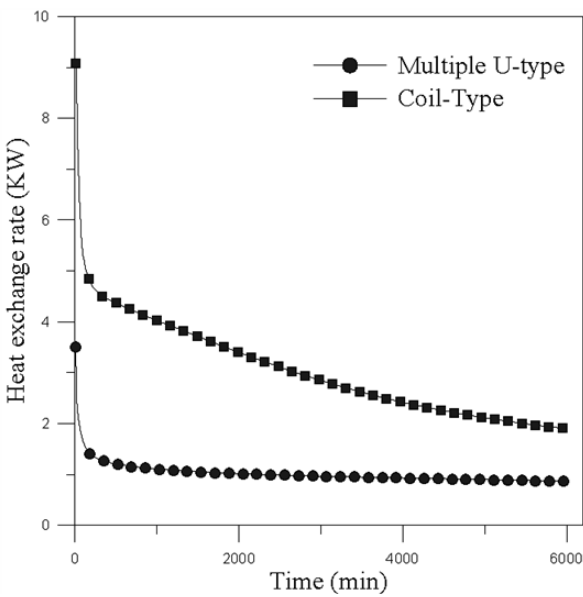


Fig. 12. Heat exchange rate for different PHC energy piles

식 (6)을 이용하여 산정한 각 PHC 에너지파일의 열교환률(heat exchange rate) 변화를 산정하여 Fig. 12에 나타냈다. 또한 Table 4에는 100시간 동안 발생한 총 열교환량을 비교하여 요약하였다. 수치해석 결과와 식 (6)을 통해 산정한 100시간 동안의 총 열교환량은 코일형 PHC 에너지파일이 342.5kW·h, 복합 U형 PHC 에너지파일이 107.08kW·h로 각각 산정되었다. 이 결과는 열교환 파이프 유출수 온도 비교에서와 마찬가지로 코일형 PHC 에너지파일에서 인접 파이프 루프 간 열간섭이 발생하여 에너지파일의 열교환 효율이 열교환 파이프 길이(혹은 열교환 면적)에 선형적으로 비례하지 않음을 보여준다. 즉, 코일형 PHC 에너지파일의 열교환 파이프 길이가 복합 U형 PHC 에너지파일에 비해 5배 정도 길지만, 말뚝 길이가 동일한 코일형 PHC 에너지파일의 총 열교환량은 복합 U형 PHC 에너지파일 보다 약 3.2배 정도 밖에 크지 않다.

본 논문에서는 Table 4과 같이 코일형 PHC 에너지파일과 복합 U형 PHC 에너지파일에 대하여 100시간 연속 냉방가동 결과로부터 산정한 에너지파일 당 총 열교환량을 기준으로 등가 열교환율(등가 환산계수)을 산정하였다. 즉, 복합 U형 PHC 에너지파일의 열교환량 또는 열교환 능력이 1일 때, 코일형 PHC 에너지파일의 상대 열교환량 또는 열교환 능력은 3.2로 평가되었다. 이 등가 환산계수는 본 현장의 PHC 에너지파일 및 지반조건에 만족하는 값이다.

4.2 PHC 에너지파일 가상 예비설계

서울 종로구 00 현장에 시공된 코일형 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일에 대해 PILESIM2 프로그램을 사용하여 가상설계를 수행하였다. 본 논문에서는 지반조건, 에너지파일 조건, 히트펌프 등 설비조건이 주어

Table 4. Comparison of total heat exchange and equivalent heat exchange efficiency factor

	Multiple (double) U-type PHC energy pile	Coil-type PHC energy pile
Temperature difference per unit (°C)	1.25	2.76
Mass velocity of fluid per unit (kg/s)	0.1085	0.2170
Number of heat exchange pipe unit	2	1
Total length of heat exchange pipe (m)	40	196
Total heat exchange (kW·h)	107.08	342.50
Total heat exchange per pipe length (kW·h/m)	2.68	1.75
Total heat exchange per pile length (kW·h/m)	10.71	34.25
Equivalent heat exchange efficiency factor	1	3.2

졌을 때 부하조건을 가정하여 PILESIM2를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 후, 시뮬레이션 결과와 히트펌프의 설계 유입온도(entering water temperature, EWT)를 비교하여 최종 부하조건을 결정하는 설계방법을 제안하였다. 그러나 PILESIM2 프로그램은 앞 절에 언급한 대로 코일형 PHC 에너지파일에 대한 시뮬레이션이 불가능하므로, 우선 복합 U형 2쌍이 병렬로 연결된 조건에 대해 설계를 수행하고 수치해석을 통해 산정한 등가 환산 계수를 설계 알고리즘에 적용하였다. PILESIM2 설계 입력 데이터로는 Fig. 13에 제시한 2010년 서울의 기상 데이터를 이용하였고, 총 100본의 PHC 에너지파일에 복합 U-형 2쌍의 열교환 파이프가 시공된 형태로 가정하였다. 설계 히트펌프 유입온도(EWT)는 히트펌프의 COP(Coefficient of Performance) 4.7를 유지할 수 있도록 하는 적정 온도, 즉 냉방 시 30°C, 난방 시 5°C로 적용하였다. 지반 열전도도는 CFD 수치해석으로 부터 역 해석한 3 W/mK을 적용하였다. 에너지파일의 설계 열저항값(Thermal resistance, R_b)은 PILESIM2 매뉴얼에서

제시하는 2쌍의 복합 U-형 열교환 파이프(double U-pipe)에 대해 추천하는 범위(0.10-0.11 K/(W/m))에서 에너지 파일 시공시 열교환 파이프가 PHC말뚝 중공면에 완전히 부착되지 않은 조건을 고려하여 안전측인 0.11 K/(W/m)을 설계에 적용하였다. 설계에 적용한 입력 데이터는 Table 5에 요약했으며, Fig. 14는 2010년 서울 대기온도에 기초하여 산정하여 설계에 적용된 연간 냉난방 설계 부하 패턴을 보여준다.

Table 5의 설계인자를 고려하여 20년간의 복합 U형 PHC 에너지파일 100본에 대한 냉난방 운용과정에서 히트펌프의 유입온도(EWT) 변화를 Fig. 15에 나타냈다. 설계에서 서울(중부지역)의 연간 대기온도로부터 산정한 기상 부하조건이 난방부하가 냉방부하보다 크므로 20년간 냉난방 가동 시, 지중온도와 함께 히트펌프 유입온도(EWT)가 점차 감소함을 알 수 있다. 하지만, 히트펌프의 COP를 유지할 수 있는 설계 최저온도(5°C) 보다 는 펌프유입 온도가 높게 유지되어 적절한 설계가 이루어졌다고 판단된다.

Table 5에서 표시된 부하량(냉방 32.16MW·h, 난방

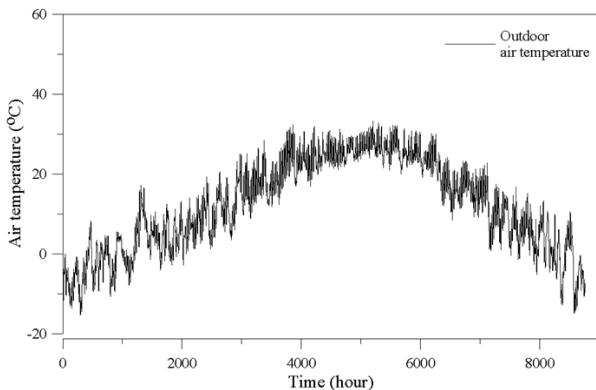


Fig. 13. Annual atmospheric temperature variation of Seoul in 2010

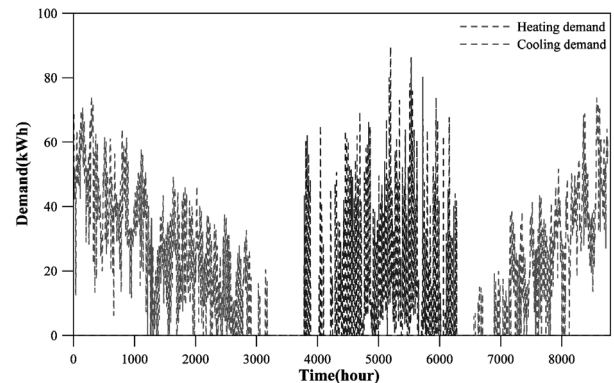


Fig. 14. Annual cooling and heating load pattern for Seoul area

Table 5. Design input parameters for PILESIM2 (double U-type PHC energy piles)

Annual obtained load	Cooling	32.16 MW·h
	Heating	136.86 MW·h
EWT of heat pump	Cooling	30°C
	Heating	5°C
COP of heat pump		4.7
Energy pile design	Dimension of energy pile	Diameter : 0.4 m, Depth : 10.0 m
	Thermal resistance of energy pile (R_b)	0.11 K/(W/m)*
	Configuration of heat exchange pipe	Double U-type
	Number of energy piles	100 piles
Thermal conductivity of ground		3 W/mK

* Considering the adverse condition in 0.10~0.11 K/(W/m) provided by PILESIM2 user manual 중

136.86MW·h)은 복합 U형 PHC 에너지파일을 100본 설치하였을 때의 연간 설계 부하량이다. 따라서 코일형 PHC 에너지파일에 대한 설계 부하량을 얻기 위해서 CFD 수치해석을 통해 산정한 등가 환산계수를 적용해야 한다. CFD 수치해석을 통해 산정된 복합 U형(2쌍) PHC 에너지파일 대비 코일형 PHC 에너지파일의 등가 환산계수는 3.2를 적용하면 코일형 PHC 에너지파일을 100본 설치하였을 때 설계 부하량은 냉방에서 102.91 MW·h, 난방에서 437.95MW·h으로 산정된다. 이때, 복합 U-형(2쌍) PHC 에너지파일과 코일형 PHC 에너지파일의 열저항 차이는 등가 환산계수에 이미 고려되었으므로 에너지파일 열저항에 대한 보정은 별도로 하지 않았다. 한편, 복합 U형 2쌍의 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일 100본을 설치했을 경우와 동일한 설계 부하량을 얻기 위해서는 약 총 32본의 코일형 PHC 에너지파일만을 시공하면 된다. 물론, 이 수치는 100본의 복합 U형 PHC 에너지파일과 32본의 코일형 PHC 에너지파일 설계시, 각 파일 간 간격은 같다는 가정에 기초한다. 코일형 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일에 대한 설계 데이터는 Table 6에 나타났다.

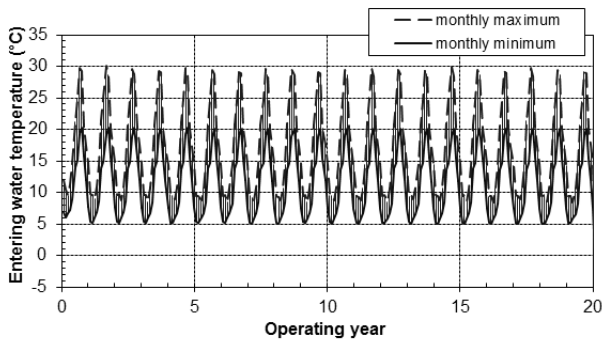


Fig. 15. Variation of heat pump EWT during 20-year simulation

4. 결론

본 연구에서는 시험 시공된 코일형 PHC 에너지파일에서 수행한 현장 열응답시험을 이룬 모델과 CFD 수치해석 모델을 통해 모사 및 역해석을 수행하여 지반의 열전도도를 예측하는 방법을 제안하였다. 또한 코일형 열교환 파이프 피치간격에 따른 열적 거동을 수치해석을 통해 분석하여 적정 피치간격 설계에 대한 고찰을 수행하였다. 마지막으로 수치해석 모델을 이용하여 복합 U형과 코일형의 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일 열교환 효율을 비교하여 등가 환산계수를 산정하고, 이를 PILESIM2를 이용한 에너지파일 설계인자로 적용하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 서울 종로구 00 현장에 시험 시공된 코일형 PHC 에너지파일에 대한 현장 열응답 시험결과를 Man et al.(2010)이 제시한 개선된 원통형 열원 모델(solid cylinder source model)과 전산유체(computational fluid dynamics, CFD) 수치해석을 통해 역해석을 수행하여 현장 지반의 열전도도를 예측한 결과 개선된 원통형 열원 모델로부터 2.5W/mK, 전산유체 수치해석으로부터 3.0W/mK의 열전도도가 평가되었다. 이 차이는 개선된 원통형 열원 모델의 경우에는 열교환기를 제외한 나머지 부분을 모두 지반으로 가정한 반면, 전산유체 수치해석에서는 현장에 시공된 PHC 에너지파일을 동일하게 모델링하여 순환수의 열이 파이프, 뒤채움재, 파일을 통해 지반으로 전달되는 것으로 상세히 모사하였기 때문으로 사료된다.
- (2) PHC 에너지파일에 설치된 코일형 열교환 파이프의 피치 간격에 따른 열적 거동을 평가하기 위하여 피치간격에 따른 일련의 전산유체 수치해석을 수행하

Table 6. Design input parameters for PILESIM2 (coil-type PHC energy piles)

Annual obtained load	Cooling	102.91 MW·h
	Heating	437.95 MW·h
EWT of heat pump	Cooling	30°C
	Heating	5°C
COP of heat pump		4.7
Energy pile design	Dimension of energy pile	Diameter : 0.4 m, Depth : 10.0 m
	Equivalent heat exchange efficiency factor	3.2
	Configuration of heat exchange pipe	Coil-type
	Number of energy piles	100 piles
Thermal conductivity of ground		3 W/mK

였으며, 수행 결과, 피치 간격이 좁아짐에 따라 총 열교환량은 증가하였으나, 파이프 루프간 열간섭 현상이 발생하여 열교환 파이프 길이당 열교환 효율은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 코일형 에너지파일 설계 시 목표 설계 부하량 외에도 시공성 및 비용 측면에서의 경제성을 모두 만족시킬 수 있는 적정 피치간격의 설계가 매우 중요하다는 것을 시사한다.

- (3) 연속 100시간 냉방모드에 대한 전산유체 수치해석 결과, 코일형 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일에 설치된 총 열교환 파이프 길이가 복합 U형(2쌍) 에너지파일에 비해 5배가 길었으나, 코일형 열교환 파이프의 좁은 피치간격에 의해 열간섭이 발생하여 총 열교환량 차이는 3.2배만을 보였다. 이로부터 복합 U형(2쌍) PHC 에너지파일에 대한 코일형 PHC 에너지파일의 등가 환산계수(또는 등가 열교환율)를 3.2로 산정하였다
- (4) PILESIM2 프로그램을 이용하여 복합 U형 2쌍의 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일에 대한 설계결과와 코일형 PHC 에너지파일에 대해 산정된 등가 환산계수 3.2를 적용하여 코일형 열교환 파이프가 삽입된 PHC 에너지파일에 대한 예비설계를 수행하고 코일형 PHC 에너지파일 설계방법을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20113030110010)과 LH 토지주택연구원과 대림산업(주) 기술개발원이 공동연구로 수행한 “구조물 기초를 이용한 지중열교환기 설계 및 시공기준 개발(2011)” 연구의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 민선홍 (2011), *현장타설 에너지파일 설계를 위한 등가 열교환율에 관한 연구*, 석사학위논문, 고려대학교.
2. 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법, 법률 제 10445호.
3. Baek, S-K (2004), *Study on ground-coupled heat pump system using hollow piles*, Ph.D. Thesis, Busan University, Korea.
4. Brandl, H. (2006), “Energy foundation and other thermo-active ground structures”, *Geotechnique*, Vol.56, No.2, pp.81-122.
5. Carslaw, S. H. and Jaeger, J. C. (1959), *Conduction of heat in*

- solids*, 2nd ed., Oxford Science Publication.
6. Cui, P., Li, X., Man, Y., and Fang, Z. (2011), “Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils”, *Applied Energy*, Vol.88, No.11, pp.4113-4119.
7. Department Of Energy, DOE (2001), “Ground-source heat pumps applied to federal facilities-second edition”, *Federal Energy Management Program*, DOE/EE-0245(PNNL-13534), US Department of Energy
8. Engineering tool box (2005), *Engineeringtoolbox.com*
9. Environmental Protection Agency, EPA (1993), “Space Conditioning : The Next Frontier, Office of Air and Radiation”, 403-R-93-0044 (4/93), Energy Protection Agency, Washington D.C.
10. Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K., and Yang, J. (2008), “Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles”, *An application, Applied Energy*, Vol.85, pp.901-910.
11. Ingersoll, L. R., Zobel, O. J., and Ingersoll, A. C. (1954), *Heat Conduction with engineering and geological application*, McGraw-Hill, New York.
12. Jeong, S., Song, J., Min, H., and Lee, S. (2010), “Thermal influence factors of energy pile”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers (KSCE)*, Vol.30, No.6C, pp.231-239.
13. Jun, L., Zhang, X., Gao, J., and Yang, J. (2009), “Evaluation of heat exchange rate of GHW in geothermal heat pump system”, *Renewable Energy*, Vol.34, pp.2898-2904.
14. Kavanaugh, S.P. and Rafferty, K. (1997), “Ground-Source Heat Pumps - Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings”, *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)*, Atlanta
15. Lee, C. (2012), *Performance of ground heat exchangers for civil infrastructures*, Ph.D. Thesis, Korea University, Korea.
16. Lee, C., Park, M., Min, S., Choi, H., and Sohn, B. (2010), “Evaluation of Performance of Grouts and Pipe sections for Close-Loop Vertical Ground Heat Exchanger by In-situ Thermal Response test”, *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.26, No.7, pp.93-106.
17. Man, L., Yang, H., Diao, N., Liu, J., and Fang, J. (2010), “A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.53, pp.2593-2061.
18. Min, S., Park, S., Koh, H., Yoo, J., Jung, K., and Choi, H. (2012), “Study on equivalent heat exchange efficiency and design method for cast-in-place energy pile”, *Proceedings of 2012 KGS Spring Conference*, Korean Geotechnical Society (KGS), pp.655-666.
19. Nam, Y., Hwang, S., and Ooka, R. (2007), “Geothermal heat pump system using foundation pile structures”, *Journal of Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol.3, No.1, pp.51-60.
20. Nam, Y., Ooka, R., and Hwang, S. (2008), “Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground source heat pump system”, *Energy and Building*, Vol.40, pp.2113-2140.
21. Nam, Y. and Ooka, R. (2011), “Development of potential map for ground and groundwater heat pump systems and the application to tokyo”, *Energy and Building*, Vol.43, pp.677-685.
22. Pahud, D. and Hubbuck, M. (2007), “Measured thermal performances of the energy pile system of the duck midfield as Zurick Airport”, *Proceedings European Geothermal Congress 2007*, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June.
23. Park, Y-B, Park, J-B, and Lim, H-S (2007), “Construction method of ground heat exchanger using energy pile in ground source heat

- system”, *KSCE magazine*, Vol.55, No.7, pp.41-46.
24. Ryu, H-K (2008), “Development and performance evaluation of ground heat exchanger utilizing PHC pile foundation of building”, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol.28, No.5, pp.56-64.
 25. Salomone, L. A. and Marlowe, J. I. (1989), “Soil and rock classification according to thermal conductivity : Design of ground-coupled heat pump systems : Final report”, Electric Power Research Inst.(EPRI), EPRI-CU-6482.
 26. Sharqawy, M. H., Mokheimer, E. M., Habib, M. A., Badr, H. M., Said, N. A., and Al-Shayea, S. A. (2009), “Energy, energy and uncertainty analyses of the thermal response test for a ground heat exchanger”, *International Journal of Energy Research*, Vol.33, pp. 582-592.
 27. Wagner, R. and Clauser, C. (2005), “Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity”, *Journal of Geophysics and Engineering*, Vol.2, pp.349-356.
 28. Yavuzturk, C., Spitler, J. D., and Rees, S. J. (1999), “A transient two-dimensional finite volume model for simulation of vertical U-tube ground heat exchanger”, *ASHRAE Transactions*, Vol.105, No.2, pp.465-474.
 29. Yoon, S., Go, G-H, Park, H-K, Park, S., Lee, S-R, Cho, K-J, and Song, C-Y (2012), “Thermal conductivity estimate of ground using energy piles”, *Journal of Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol.8, No.4, pp.8-16.
- (접수일자 2013. 1. 24, 수정일 2013. 7. 25, 심사완료일 2013. 7. 30)