한국지반공학회논문집 제27권 8호 2011년 8월 pp. 39 ~ 50

말뚝 간격에 따른 에너지 파일의 열적 거동분석

Effect of Group Spacing of Energy Piles on Thermal Analysis

민 혜 선[1] Min, HyeSun
윤 태 섭[2] Yun, TaeSup
정 상 섬[3] Jeong, SangSeom

Abstract

This study was conducted to analyze the thermal behavior of a PHC energy pile system in saturated soil conditions, various seasonal and flow-speed conditions during 100 hours of operation through numerical analysis. The examination was also conducted with a single pile as well as with group piles. For the operation of 100 hours, the average heat exchange rate appeared 55 W/m, 47 W/m during winter and summer respectively. An increase in flow-speed was associated with a rise in the heat exchange rate. And thermal behavior analysis results during winter season show that thermal efficiency has increased when there are more free thermal planes. For the operation in group pile as 3D and 5D pile spacing (D: pile diameter), average heat exchange rate increased as pile spacing grows. Compared with the heat exchange rate of single pile, thermal exchange efficiency of group pile decreased by 89% (for 3D spacing) and 93% (for 5D spacing).

요 지

본 논문에서는 지열을 이용한 PHC 말뚝형 에너지 파일의 계절별 유속변화에 따른 열교환율과 단독말뚝 및 군말뚝의 열교환율을 100시간 운용 시 포화지반 조건에 한정하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과 동절기 및 하절기일 때 100시간 운용 시 평균 열교환율은 약 55 W/m, 47 W/m로 나타났으며, 순환수 유속이 증가할수록 전체적인 열교환율이 상승하였다. 동절기에 말뚝간격 3D 및 5D(D:말뚝직경) 배치 시 0.6m/s의 순환수 유속에 따른 열적거동을 분석결과 지반과의 열적 자유면이 많은 외곽부일수록 열효율이 증가하였다. 또한, 3D 및 5D 간격의 평균 열교환율은 약 48.5 W/m, 51 W/m로 말뚝간격이 증가할수록 열교환율이 향상되는 것으로 나타났으며, 단독말뚝의 열교환율 대비 상대적으로 3D 및 5D 간격의 군말뚝은 각각 89% 및 93%로 떨어지는 것을 알 수 있었다.

Keywords : Energy piles, Group piles, Heat exchange rate, Thermal conductivity

1. 서 론

21세기를 맞이하여 에너지 절약에 대한 관심이 증폭되고 있고, 경제성과 친환경성을 동시에 만족시킬 수 있는 신재생에너지에 대한 연구가 진행되고 있다. 신재생에너지는 크게 지열, 풍력, 태양열, 바이오매스, 소수력, 해양에너지, 폐기물에너지의 8개 분야의 재생에너지와 석탄액화가스화, 연료전지, 수소에너지의 3개의 신에너지로 구분되고 있다. 신재생에너지 중 지열에너지는 반영구적이며 환경 친화적인 에너지로 지구의 내

1 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ. linykies@yonsei.ac.kr)
2 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ., taesup@yonsei.ac.kr)
3 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr 교신저자)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

핵 및 외핵에서 발생된 지열을 이용하여 지열발전, 지열 냉난방 등으로 많은 연구와 적용을 하고 있으며, 이 중에 지열 냉난방 시스템은 현재까지 개발된 냉난방 시스템 중에서 가장 효율이 높으며 반영구적, 친환경적인 시스템으로 보고되고 있다(Environmental Protection Agency, 1993).

우리나라에도 2000년에 지열 냉난방이 도입 되었으며, 근래에 저탄소 녹색성장 정책과 더불어 최근 지열에너지를 이용하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지열에너지를 이용하기 위한 여러 가지 수단 중 PHC 말뚝을 이용한 에너지 파일은 말뚝기초의 시추공 굴착과 열교환기 설치 및 운용, 깊은 기초로서의 성능을 동시에 만족시키는 경제적인 지열에너지 운용체이다(한국지질자원연구원, 2006). PHC 말뚝형 에너지 파일은 PHC 말뚝을 이용하기 때문에 말뚝배치에 영향을 크게 받으며, 기본적으로 구조물의 구조적 안정성을 우선시하기 때문에 열교환기 배치에 제약을 받는다. 따라서 에너지 파일의 열교환기 설치 및 배치 위치는 PHC 말뚝의 군말뚝 배치개념을 고려하여 배치조건을 검토하여야 하며, 말뚝의 배치간격을 고려한 에너지 파일의 열적거동에 대한 검토가 필요하다. 또한, 에너지 파일의 운용에 있어서 계절 및 순환수 유속의 영향과 지반의 포화조건에 따라서 열저항 및 열교환율의 변화를 보이기 때문에 이에 대한 검토도 요구된다.

현재 국내에서 실시한 에너지 파일에 관한 연구는 PHC 에너지파일의 열적 및 구조적 특성에 관한 연구(송진영, 2011)와 산업자원부 지원 하에 코오롱건설(주)에서 수행한 고성능 저가형 지중 열교환기 개발 연구(2006)와 백성권의 중공 말뚝을 이용한 지열 냉난방 시스템 개발에 관한 연구(2004) 등이 있다. 외국의 경우 PHC 말뚝형태의 마찰말뚝에 시공된 에너지 파일의 열효율을 현장실험을 통하여 측정하였으며(Hamada 등, 2007), 에너지 파일의 열저항과 열교환율을 Linear source theory와 Cylindrical source theory를 통해 산정하여 이론과 현장시험을 통해 측정된 열교환율을 비교하였고 (Liu Jun 등, 2009), 에너지 파일에 순환수 온도에 따른 말뚝의 수축, 팽창거동과 하중전이기구의 변화에 대한 연구가 진행되었다(Bourne-Webb 등, 2009).

본 연구에서는 현장에서 실측 및 실험하기 힘든 조건인 단독말뚝의 계절별, 순환수 유속조건별 조건과 군말뚝에 대한 열적거동을 수치해석을 통하여 분석하였다. 이를 위하여 유한체적해석(FVM)을 사용하여 단독말뚝과 파일 배치간격이 3D와 5D(D:말뚝직경)인 3×3 배치형태의 군말뚝을 해석하였다. 해석은 지반 3차원 모델링 후 열교환기 내부순환수의 유속조건에(0.3m/s, 0.6m/s, 0.9m/s, 1.2m/s)에 따른 해석과 장기간(100시간) 운용에 따른 해석을 수행하여 열적거동을 분석하였다.

2. 에너지 파일의 열적거동 영향인자

2.1 조건별 에너지 파일 열전달 영향인자

지열 에너지는 지구가 생겨날 때 운동에너지로부터의 잔여 열과 액체 상태인 외핵의 철(Fe)이 내핵으로 향하면서 생겨나는 열, 두터운 맨틀과 지각에 함유된 우라늄(U), 칼륨(K) 등의 방사성 동의원소 붕괴 시 발생하는 붕괴열, 지중(토양, 지하수, 지표수 등)에 저장된 태양복사에너지 등으로 이루어져 있다. 이 중 지중에 저장된 지열에너지는 지구에 도달하는 전체 태양복사에너지 중 약 47%를 차지한다(박용부 등, 2007). 지반 속에 저장되는 지열에너지는 지하 300m 이상의 313~423K 고온의 심부지열과, 300m 이하의 278~288K의 저온의 천부지열로 나눌 수 있다. 에너지 파일의 열원은 천부지열을 이용하여 말뚝에 지반-파일-내부 충진재-열교환기-내부순환수로 열전달이 이루어지며 그 양상은 매우 복잡하다. 기존에 알려진 에너지 파일의 주요 영향인자는 표 1과 같다.

2.2 에너지 파일의 열전달 기본 이론

에너지 파일의 열전달 해석의 경우 유체인 내부순환수

표 1. 에너지 파일 영향인자(Liu Jun 등, 2009)

구 분	내 용
local condition	설치위치의 기후, 지하수 상태, 지반의 열적 물성, 지열분포
GHE(Ground Heat Exchanger) parameter	열교환기의 종류, 깊이, Borehole직경과 Borehole의 간격, 열교환기 사이간격(Shank space), 파이프의 직경, 내부 채움재의 물성
operation condition	냉각과 가열 하중, Heat pump system, 운용방법

와 고체인 말뚝과 지반 등을 고려하여 열복사(Radiation) 현상을 제외한 열전도(Conduction)와 열대류(Convection)만 고려한다. 열의 전도식은 식 (1)에 나타나 있으며, 이는 프랑스의 수리 물리학자 Fourier가 정의 한 Fourier의 열전도 법칙(Fourier's law of heat conduction)이다. 열의 대류는 고체벽의 단위면적, 단위시간 당 전열량(열유속) q는 벽면의 온도 T_w와 유체의 온도 T_f와의 차에 비례하고 다음 식 (2)와 같이 표현된다. 열전달에 의한 전열량 q의 식 (2)는 매우 간단한 형식으로서, 물리학자 Isaac Newton에 의해서 발견되어 Newton의 냉각법칙(Newton's law of cooling)이라고 한다. 여기서, 비례상수 $k[W/m \cdot K]$를 열전도율(thermal conductivity)라 하고, $\triangle T = T_1 - T_2$, $\triangle x = \delta$이며, $\triangle T/\triangle x$는 단위 길이 당 온도변화이다. T_f는 벽면에서 충분히 떨어진 위치에서의 유체온도, h는 비례상수로서 대류열전달계수(convection heat transfer coefficient)라하며, 단위는 [W/m2K]로 표시한다.

$$Q \propto \frac{T_1 - T_2}{\delta} A \quad \text{or} \quad Q = k\frac{T_1 - T_2}{\delta} A = -k\frac{\triangle dT}{dx} A \tag{1}$$

$$q = h(T_f - T_w) \tag{2}$$

2.3 에너지 파일의 열저항과 열교환율

에너지 파일의 열교환율을 산정하기 위하여 열전달 매개체의 열 저항을 산출하여 열교환율을 산정하여야 한다. 에너지 파일의 열교환율은 에너지 파일의 열효율을 측정하는 척도이며, 열교환율을 산정하기 위해서는 열전달 매개체의 열 저항 산정 후 열 저항에 따른 시간별 열교환율을 산정하여야 한다. 본 논문에서의 열전달 매개체는 내부 순환수, HDPE 파이프, 내부 속채움재, PHC 말뚝, 지반이며, 각각의 열 저항을 구하고 합산하여 전체 열 저항을 산정하는 방법(Liu Jun 등, 2009)을 이용하였다.

여기서, d_{hi}: 열교환기내경, d_{ho}: 열교환기외경
h_i: 대류열전달계수, Re: 레이놀드수
Pr: 프란틀수, d_{ci}: *PHC*말뚝내경
d_{co}: *PHC*말뚝외경, d_b: 속채움재직경
k_f, k_h, k_b, k_c, k_s: 내부순환수, *HDPE*파이프, 속채움재, *PHC*, 지반열전도도
R_{conv}, R_{hdpe}, R_{grut}, R_{phc}, R_{soil}: 내부순환수, *HDPE*파이프, 속채움재, *PHC*, 지반열저항

먼저 내부 순환수에 흐르는 유체의 열 저항은 유체의 대류열전달현상에 따라 열전달이 이루어지며, 대류열전달계수(h_i)를 계산하여 열 저항을 산정한다. 열교환기 내부에 흐르는 내부 순환수의 열 저항은 식 (3)과 같다.

$$R_{conv} = \frac{1}{\pi d_{hi} h_i} \tag{3}$$

식 (3)에서 대류열전달계수(h_i)는 유체의 유속과 점성, 고체부의 표면저항 등의 현상에 따라 유체의 열전달 값이 달라진다. 유체의 흐름이 Internal flow 혹은 turbulent flow의 경우 대류 열전달계수는 다음 식 (4)와 같이 표현된다.

$$h = \frac{k_w}{D_H} N_u \tag{4}$$

여기서, k_w: 유체의 열전도도
D_H: 유체가 흐르는 직경
N_u: Nusselt number

위 식 (4)에서 Dittus-Boelter의 상관관계에 의하여 N_u는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$N_u = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot \mathrm{Pr}^n \tag{5}$$

따라서 대류열전달계수는 Dittus-Boelter 상관관계에 따라 구해지며 식 (6)과 같다.

$$h_i = \frac{0.023 Re^{0.8} \mathrm{Pr}^n k_f}{d} \tag{6}$$

여기서, n은 계절에 따라 달라지는 값으로 동절기 n=0.3, 하절기 n=0.4

열교환기 및 PHC 파일의 경우 고체의 열전도 현상을 가지며 열교환기의 경우 열교환기의 내경부에 유체와의 열전달이 이루어진다. 따라서 열교환기의 열 저항은 내경과 외경 및 열교환기 재료의 열전도도를 고려하여야 하며, PHC 말뚝의 경우 말뚝의 내경 및 외경부에서 고체 열전도가 이루어지며 말뚝의 내경부와 외경부의 직경 및 열전도도를 통하여 열 저항 산출이 이루어진다. 열교환

기와 PHC 말뚝의 열 저항은 식 (7)과 식 (8)과 같다.

$$R_{hdpe}=\frac{\ln(d_{ho}/d_{hi})}{2\pi k_h} \quad (7)$$

$$R_{PHC}=\frac{\ln(d_{co}/d_{ci})}{2\pi k_c} \quad (8)$$

속채움재의 열 저항 산정은 속채움재의 직경과 내부 U-type pipe의 외경 및 배치에 따라 달라지는데 Bennet 등(1987)이 개발했으며, 이 식은 Remund가 1999년 열교환기 배치에 따른 열 저항 산정 식을 제안했다. U-type 열교환기 사이간격을 shank space라고 하며 이러한 간격과 배치에 따라서 β_0, β_1 값이 달라지고 속채움재에 의한 열 저항 값이 차이가 난다. 표 2는 열교환기 배치 형태별 계수를 나타내며, 본 논문에서는 B 타입을 사용하였다. 식 (9)는 속채움재의 열 저항을 나타낸다.

$$R_{grout}=\frac{1}{k_g\beta_0(d_b/d_{ho})^{\beta_1}} \quad (9)$$

여기서, β_0, β_1은 표 2에 나타난 열교환기 배치에 따른 상수

PHC 말뚝 외부의 지반 열 저항을 산정하기 위하여 지반 조건은 ① 지반의 열적물성은 균질, 등방 ② 함수량 변화 무시 ③ 지하수의 이동효과 배제 ④ 각 매개체간 접촉열 저항 무시 등의 가정을 하여 지반의 열 저항을 산정하였으며, 열 저항 산정과 열교환율은 다음의 Kelvin의 line source theory(Bose 등, 1985)를 사용하였다.

$$\Delta T=t_r-t_\infty=\frac{q}{2\pi k_s}\int_{\frac{r}{2\sqrt{at}}}^{\infty}\frac{e^{-\beta^2}}{\beta}d\beta=\frac{q}{2\pi k_s}I(x) \quad (10)$$

여기서, $r=r_b$

식 (10)에 따라 지반의 열 저항은 다음과 같이 변환하여 표현된다.

$$R_{soil}=\frac{t_b-t_\infty}{q}=\frac{1}{2\pi k_s}I\left(\frac{r_b}{2\sqrt{a\tau}}\right)=\frac{1}{2\pi k_s}I\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}}\right) \quad (11)$$

여기서, r_b는 보어홀의 반경이며 a는 thermal diffusivity of soil, τ은 시간을 나타내며, Fo는 Fourier number이다.

또한, $x=\frac{1}{2\sqrt{Fo}}$, $0<x\le 1$ 일 때 $I(x)$는

$$I(x) = 0.5(-\ln x^2-0.57721566+0.99999193x^2-0.24991055x^4+0.05519968x^6-0.00976004x^8+0.00107857x^{10}) \quad (12)$$

$x\ge 1$ 일 때 $I(x)$는

$$I(x)=\frac{1}{2x^2\exp(x^2)}\frac{A}{B} \quad (13)$$

여기서,

$$A=x^8+8.5733287x^6+18.059017x^4+8.637609x^2+0.2677737$$

$$B=x^8+9.5733223x^6+25.6329561x^4+21.0996531x^2+3.9684969$$

식 (14)는 지반의 열 저항을 나타내며, 시간의 변화에 따른 지반의 열 저항을 나타낸다. 지반의 경우 초기상태에서 열 교환이 발생하면 지반의 열 저항이 증가되며 이러한 현상에 의하여 전체적인 열 저항은 증가하게 된다. 따라서 PHC 말뚝의 경우 전체 열 저항은 지반, PHC 말뚝, 속채움재, 열교환기(HDPE) 및 내부 순환수의 열 저항의 합과 같으며 특히 지반의 경우 시간에 따른 열

표 2. 열교환기(U-type)배치별 β_0, β_1 값(Remund, 1999)

Configuration	β_0	β_1	Correlation coefficient	Pipe type
A	20.10	-0.9447	0.9926	
B	17.44	-0.6052	0.9997	
C	21.91	-0.3796	0.9697	

저항의 증가로 전체적인 열 저항이 증가됨을 알 수 있다. 전체적인 열 저항은 식 (14)로 표현할 수 있다.

$$\Sigma R = R_{conv} + R_{hdpe} + R_{grut} + R_{phc} + R_{soil} \qquad (14)$$

식 (14)를 이용해서 전체 열 저항을 산정 한 후, 열교환율 산정식 (15)와 (16)에 대입하고 두 식을 연립하여 유출수 온도 t_0를 산정한다. 산정된 유출수 온도 t_0를 다시 (15) 또는 (16)에 대입하면 열교환율을 산정 할 수 있다.

$$q = \frac{\overline{t_f} - t_\infty}{\Sigma R} = \frac{(t_i + t_0)/2 - t_\infty}{\Sigma R} \qquad (15)$$

$$q = \frac{\dot{m} c_p (t_i - t_o)}{L} \qquad (16)$$

3. 조건별 에너지 파일의 열적거동 수치해석

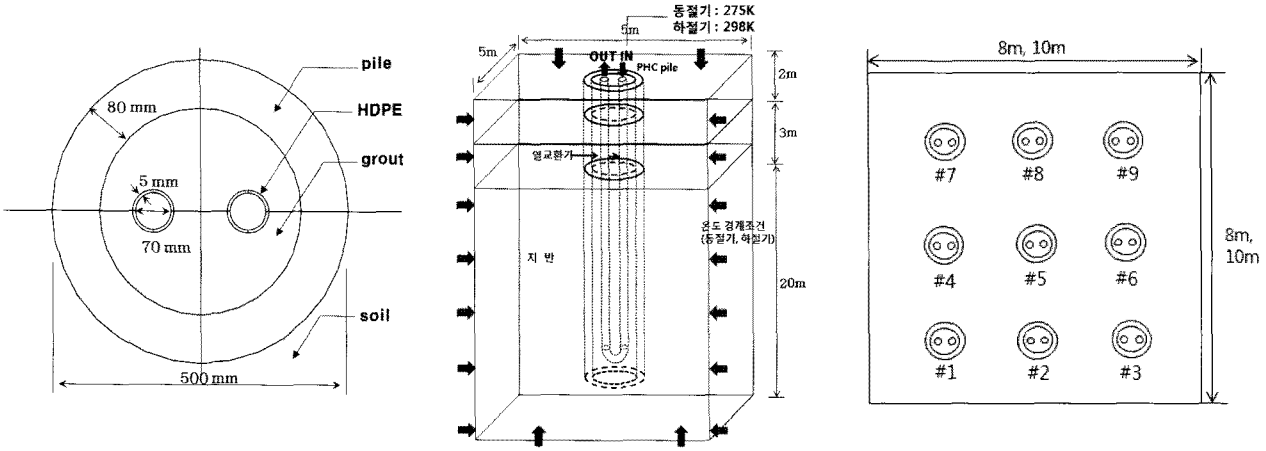
3.1 경계조건 및 물성치

본 연구에서는 에너지파일의 열적거동을 유한체적요소법(FVM)을 사용하여 분석하였다. 수치해석 모델은 그림 1과 같이 PHC 말뚝은 외경 0.5m, 내경 0.34m, 길이 20m의 PHC 말뚝으로 설정하였으며, 내부에 Φ70mm, 두께 50mm, 길이 40.2m의 HDPE(High density poly-ethelen)을 배치하였고, HDPE관에 내부순환수(물)를 유입(동절기 275K, 하절기 298K)시키면서 5m×5m×20m 크기의 지반모델에 2m(279K), 3m(283K), 15m(288K)의 지중온도를 경계조건으로 설정하였다. 단독말뚝의 경우 지반 중심에 배치하여 열적거동을 파악하였으며, 군말뚝의 경우 총 9개의 동일한 PHC 말뚝을 3D 및 5D(D:말뚝직경) 간격으로 그림 1과 같이 배치하였다. 지반은 포화지반으로, PHC 말뚝 등은 건조 상태로 가정하였다. 재료별 물성치는 표 3과 같다.

3.2 해석조건 및 격자 요소망 형성

본 연구에서는 표 1의 영향인자 중 유속이 없는 건조, 포화지반 및 GHE parameter와 운용조건 중 동절기의 지반으로부터의 가열과정과 하절기의 내부순환수의 냉각과정을 지반과의 열 교환이 충분히 진행되는 100시간의 해석시간으로 설정하였다.

수치해석은 2단계로 나누어 실시하였다. 1단계에서는 지

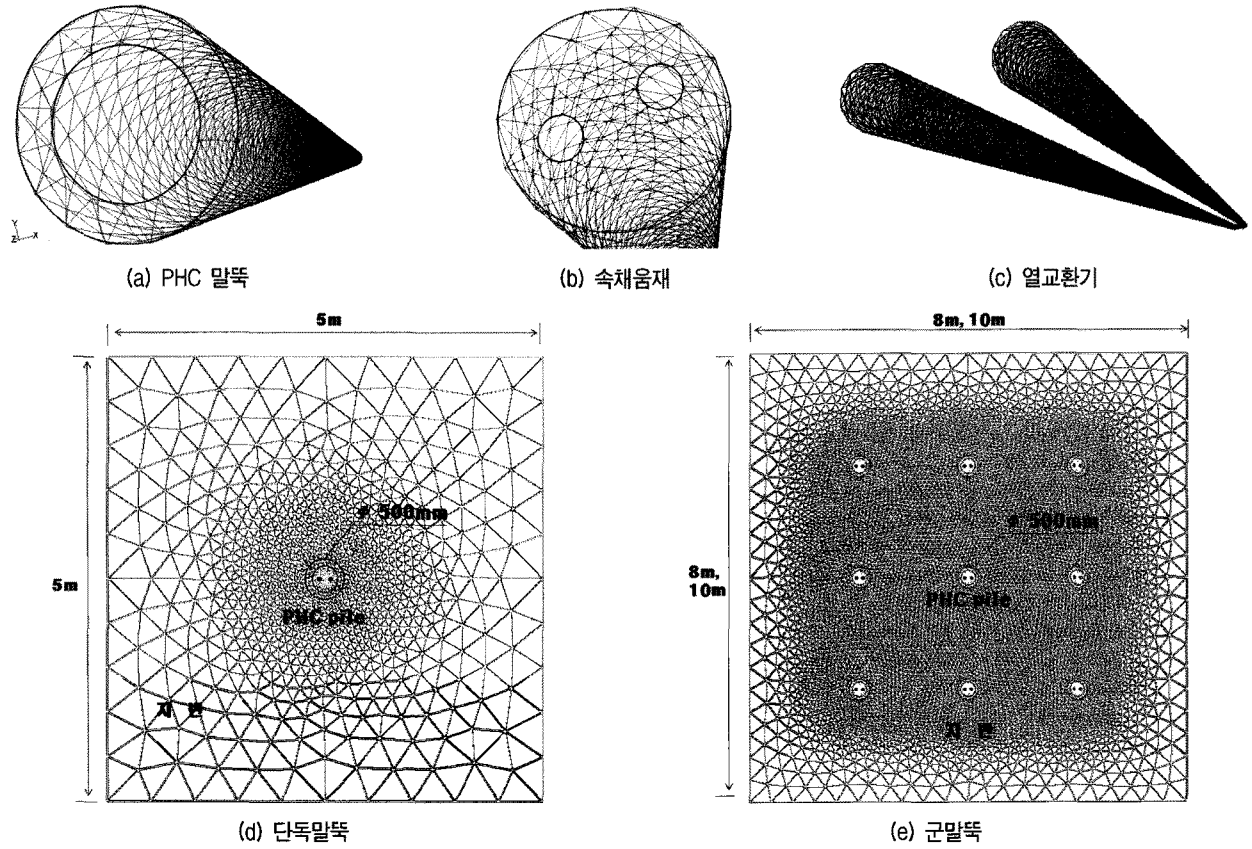


(a) PHC 말뚝 단면도 (b) 단독말뚝 모델링 (c) 군말뚝 모델링

그림 1. 단독말뚝(단열재 포함) 및 군말뚝 모델링

표 3. 해석에 사용된 물성치(김도현, 2010)

구 분	Density(kg/m^3)	Specific Heat(J/kg·K)	Conductivity(W/m·K)	Viscosity(kg/m·s)	Diffusivity(m^2/s)
포화지반	2100	1300	2.5	-	9.2×10^{-7}
PHC pile	2700	790	1.62	-	7.6×10^{-7}
속채움재(Cement Grout)	3640	840	2.02	-	6.6×10^{-7}
HDPE	955	525	0.4	-	8.0×10^{-7}
Water	998.2	4182	0.6	0.001003	1.4×10^{-7}



(a) PHC 말뚝 (b) 속채움재 (c) 열교환기

(d) 단독말뚝 (e) 군말뚝

그림 2. 모델별 격자 요소망

반과 PHC말뚝의 초기온도를 형성하기 위하여 내부 순환수의 유속이 없는 상태로 설정하고, 지중 깊이별 경계면에 지반온도를 경계조건으로 설정하여 정상상태(steady-state)로 해석하였다. 2단계에서는 100시간의 transient 조건으로 내부 순환수의 유속조건별(0.3m/s, 0.6m/s, 0.9m/s, 1.2m/s) 해석을 실시하였다. 수치해석 수행 후 이론적 검증을 위하여 line source theory(Bose 등, 1985)를 이용하여 이론적 검증을 수행하였다.

수치해석의 격자 요소망은 Gambit 2.3.16 프로그램을 사용하여 모델링한 후, FLUENT 6.3.26 버전을 통하여 수치해석을 수행하였다. 지반의 깊이는 경계면 영향을 최소화하기 위하여 군말뚝의 경우 좌우경계면과 충분한 이격 거리를 형성하였고, 지반의 깊이는 25m로 설정하였다. 또한, 열교환기의 격자요소 형성의 경우 지반크기를 고려하여 5mm의 얇은 두께로 직접적인 격자 요소를 형성하지 않고 FLUENT의 wall thickness 기능을 이용하여 HDPE 물성치를 가진 5mm 두께의 열교환기로 설정하였다. 군말뚝은 3D 및 5D 간격으로 가로세로가 각각 8m 및 10m, 깊이 25m 크기의 지반으로 형성하였다. 또한, 경계조건의 영향을 최소화하기 위하여 경계조건과 말뚝간격을 3D 및 5D 모두 2.5m의 거리로 이격시켰다. 형성된 격자 요소망은 그림 2와 같다.

4. 해석결과

4.1 단독말뚝의 계절별, 유속별 해석결과

계절별, 순환수 유속조건별 해석결과 동절기에는 지반에서 열을 흡수하는 과정이 진행되고 하절기에는 지반으로 열을 배출하는 과정이 진행된다. 그림 3은 포화지반에서 동절기일 때 유입수 100시간 유입 시 내부순환수 유출온도를 나타낸다. 초기 20시간 이전의 경우는 수치해석과 이론값이 수치해석의 1단계의 지반의 정상상태 형성에 따른 유출수 온도가 큰 차이를 보였고, 20시간 이후는 유출수 온도가 0.1K 이내로 유사하게 나타났다. 따라서 그림 3은 초반 20시간을 제외한 20시간 이후의 유출수 온도거동을 나타냈다. 유출수 온도는 동절기의 경우 순환수 유속이 증가할수록 1회당 열교환율이 저하되어 온도가 낮게 나타났으며, 하절기의 경우 유출수의 온도가 높게 나타났다. 열교환율의 경우 지반에서 열

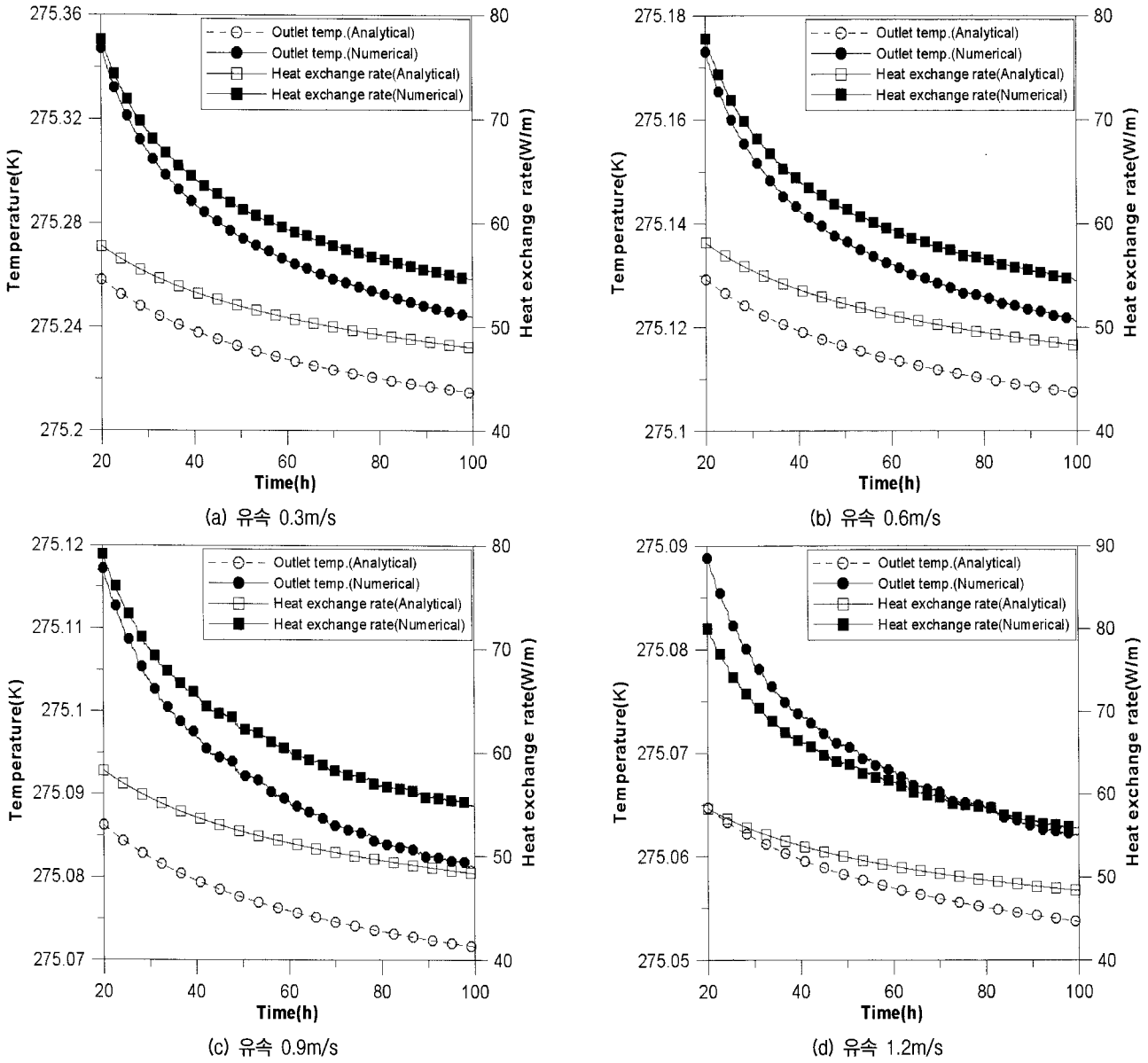


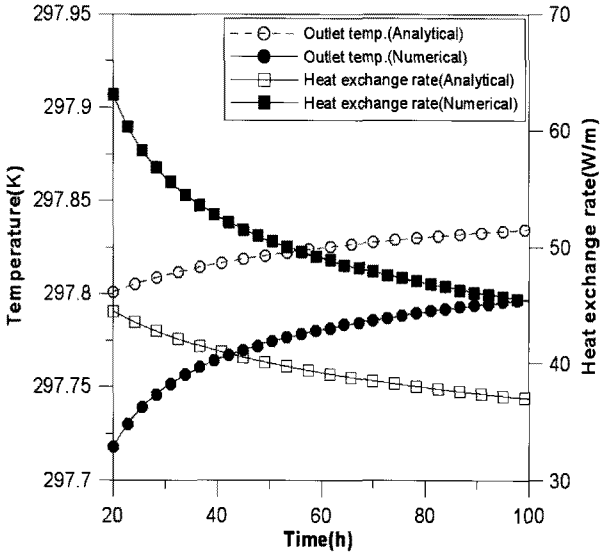
그림 3. 동절기 포화지반 유속별 유출온도 및 열교환율(100시간 운용 시)

교환기로 열을 흡수하는 과정인 동절기일 때 평균적으로 약 55W/m의 열교환율을 보였고, 순환수 유속이 증가할수록 전체 순환횟수가 증가하기 때문에 1회 열교환율은 순환수 유속이 작을수록 크지만 전체적인 열교환율은 순환수 유속이 증가할수록 커지는 것으로 나타났다.

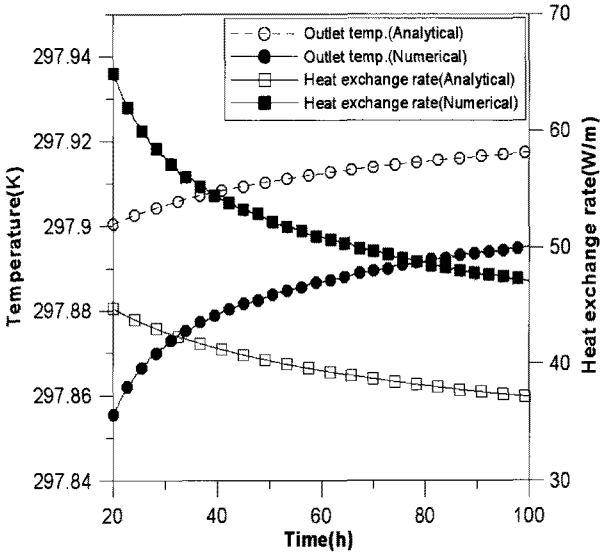
하절기의 경우 열교환기에서 지반으로 열의 이동이 일어난다. 그림 4는 하절기에 순환수 유속별로 100시간 운용 시 유출수 온도와 열교환율을 나타내며, 평균 47 W/m의 열교환율을 나타냈다. 하절기의 순환수 유속별 유출수 온도를 보면 유속이 작을수록 1회 순환 시 유출수 온도가 높게 나타났으며, 열교환율을 보면 동절기 지반과 마찬가지로 순환수 유속이 커질수록 전체 순환횟수가 증가하여 전체적인 열교환율은 높게 나타났다. 결과적으로 하절기와 동절기 모두 순환수 유속이 증가할수록 열교환율이 증가하였다.

4.2 군말뚝 열적거동 해석결과

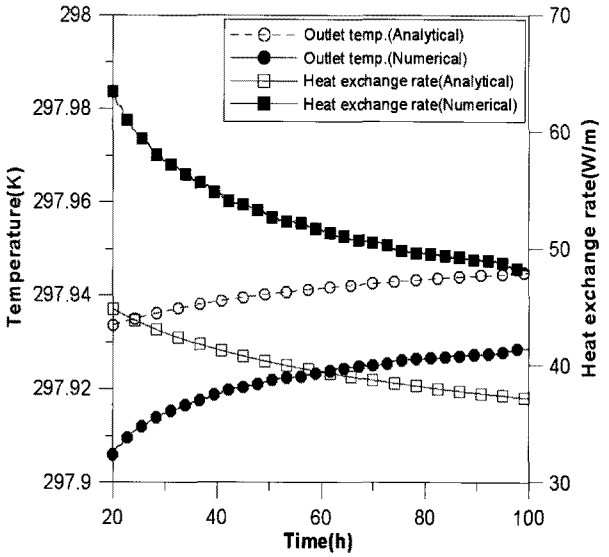
에너지 파일은 설치 시 말뚝의 배치에 따라 말뚝 상호간에 열적간섭이 일어난다. 대형구조물의 기초가 통상 군말뚝 형식임을 감안할 때 말뚝내부에 열교환기 설치 후 지열 이용 시 군말뚝에 전달되는 지열분포는 말뚝 위치에 따라서 달라짐을 의미한다. 여기서 군말뚝에서의 열교환기 설치는 에너지 파일을 주목적으로 하는 열교환기 설치가 아니라, 구조적으로 안정된 군말뚝 배치에 선택적으로 열교환기를 설치하여 지열이 최적으로



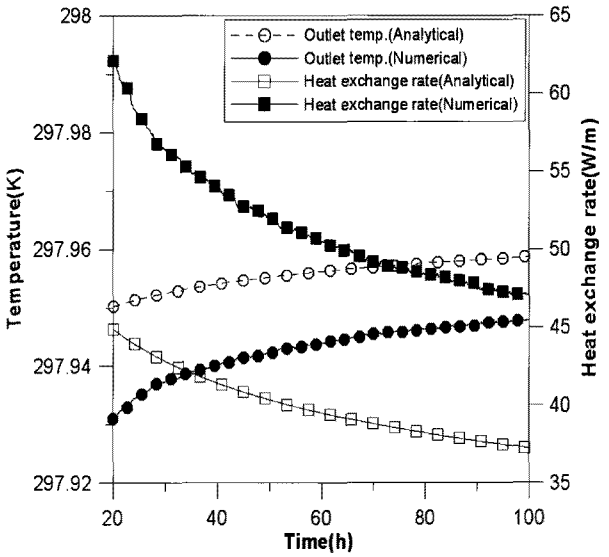
(a) 유속 0.3m/s



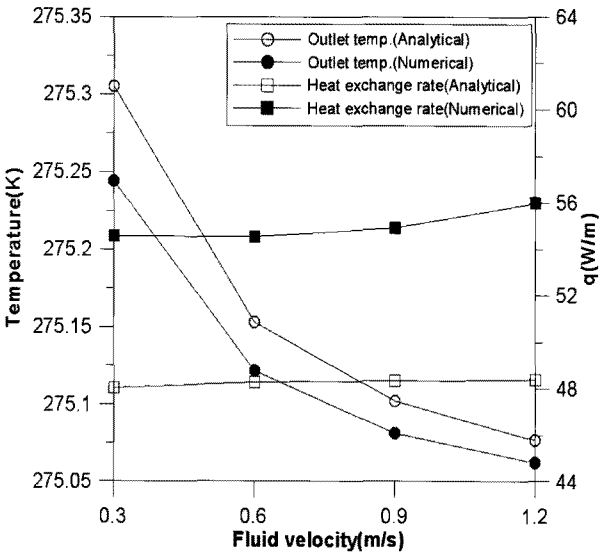
(b) 유속 0.6m/s



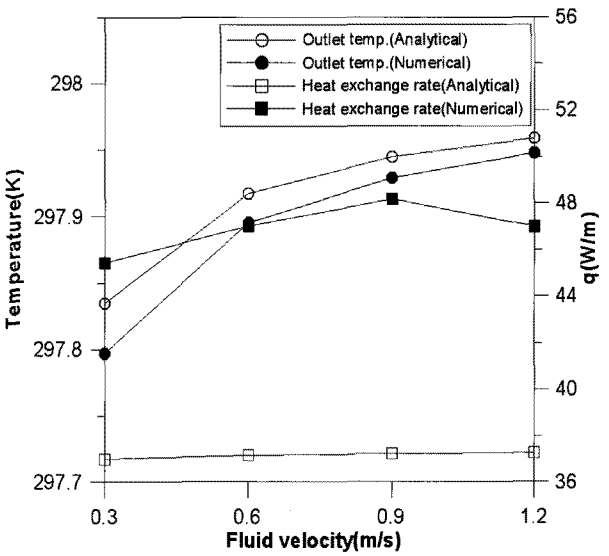
(c) 유속 0.9m/s



(d) 유속 1.2m/s

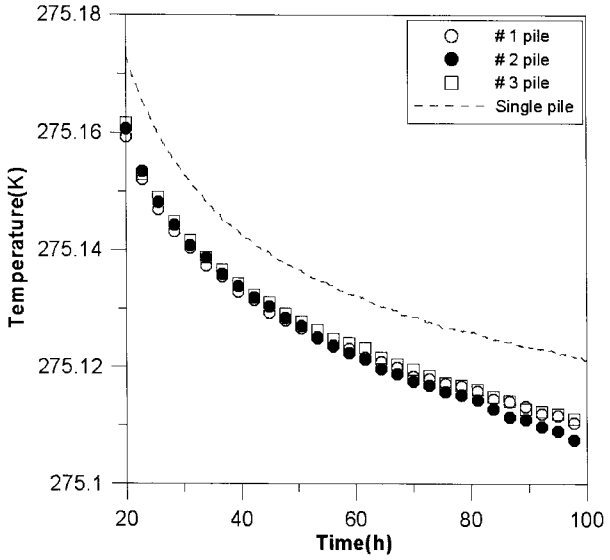


(e) 동절기 유속별 유출수온도 및 열교환율

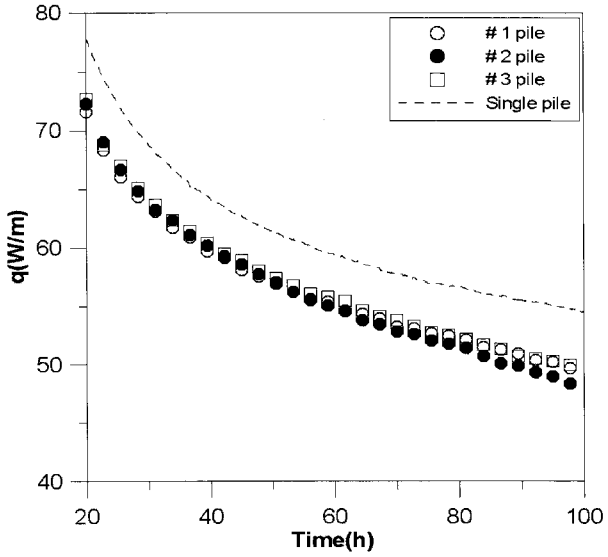


(f) 하절기 유속별 유출수온도 및 열교환율

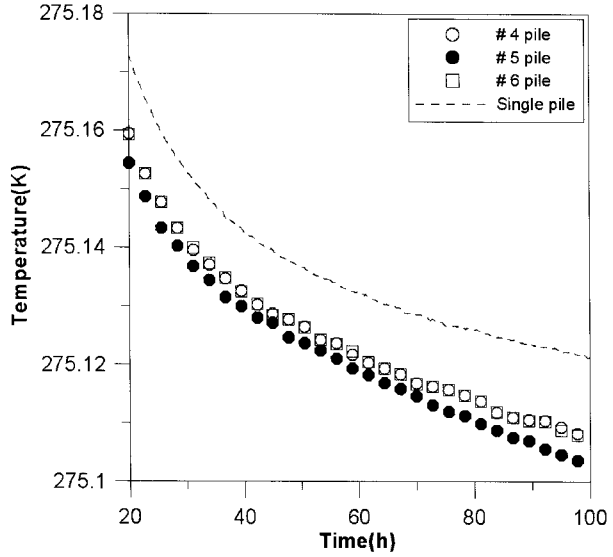
그림 4. 하절기 포화지반 유속별 유출온도, 열교환율 및 유속별 열교환율(100시간 운용 시)



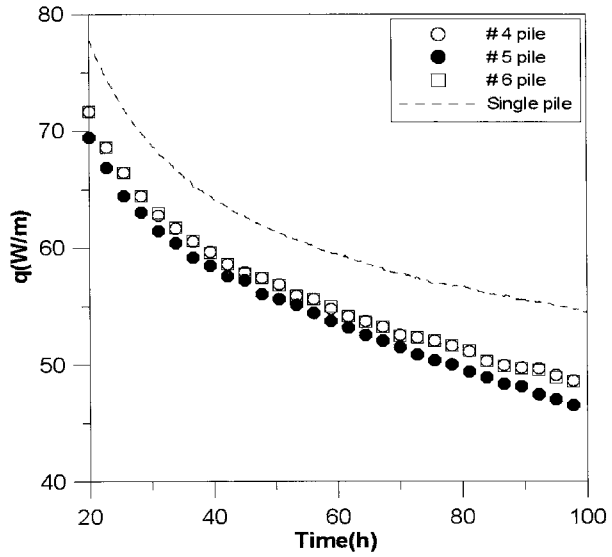
(a) 1,2,3번 파일 유출수 온도



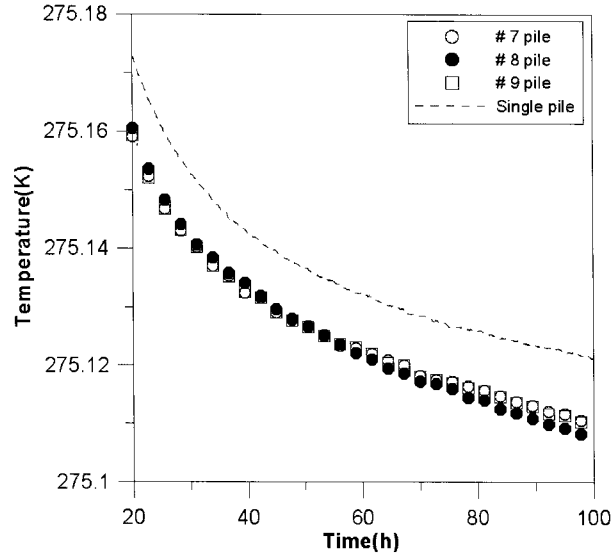
(b) 1,2,3번 파일 열교환율



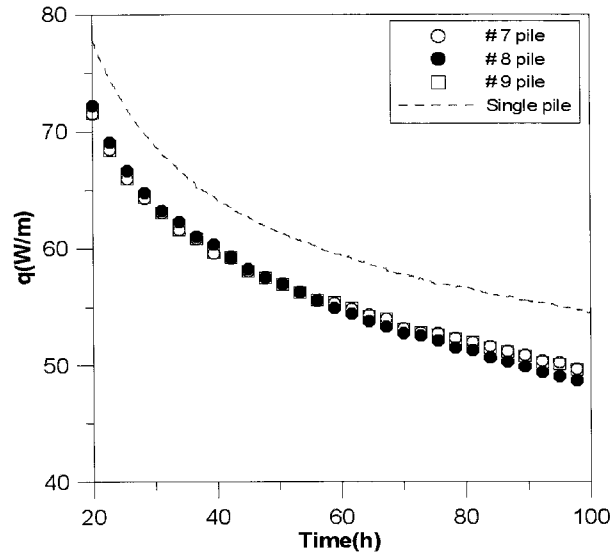
(c) 4,5,6번 파일 유출수 온도



(d) 4,5,6번 파일 열교환율

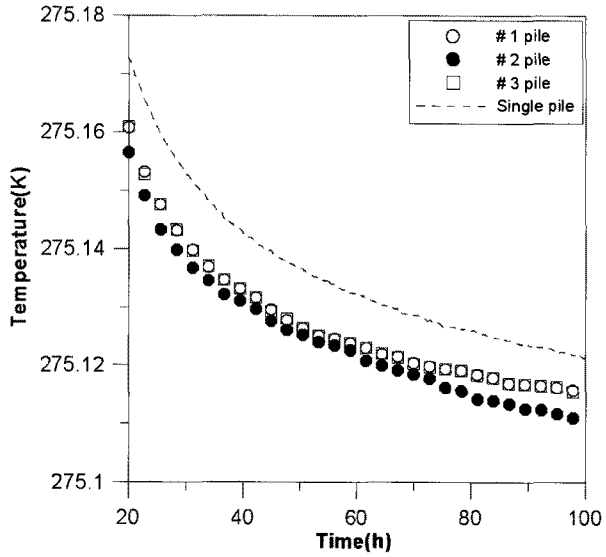


(e) 7,8,9번 파일 유출수 온도

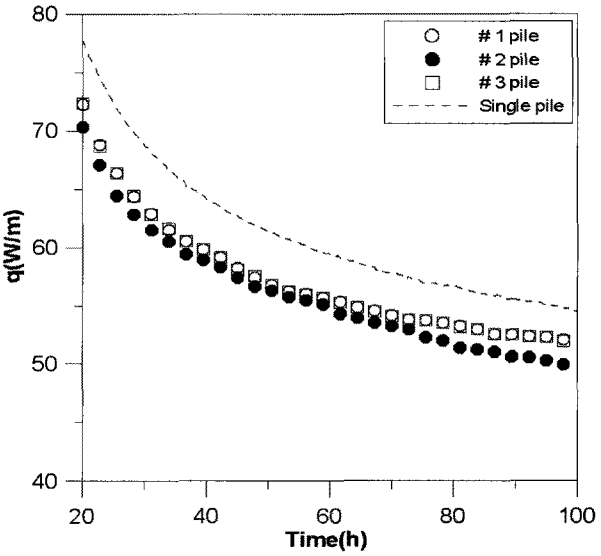


(f) 7,8,9번 파일 열교환율

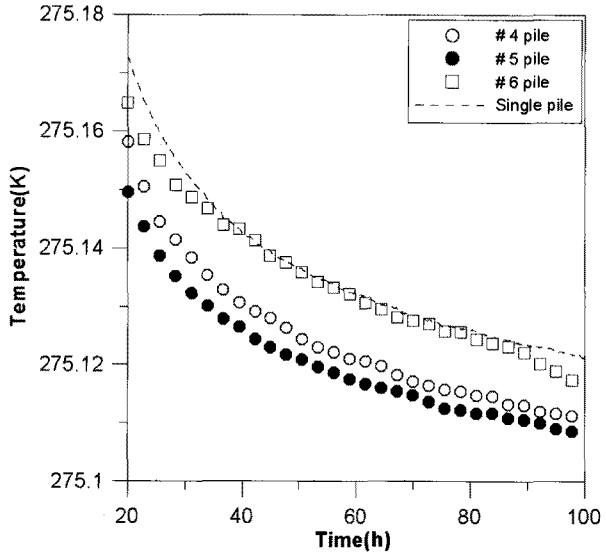
그림 5. 3D(D:말뚝간격) 배치 간격에 따른 말뚝별 유출수 및 열교환율



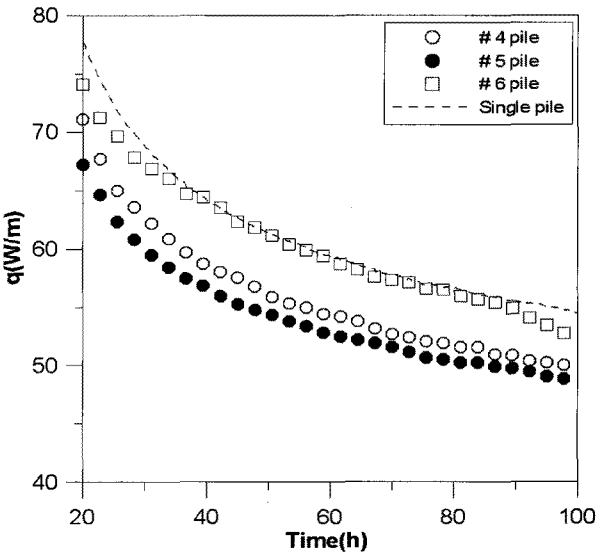
(a) 1,2,3번 파일 유출수 온도



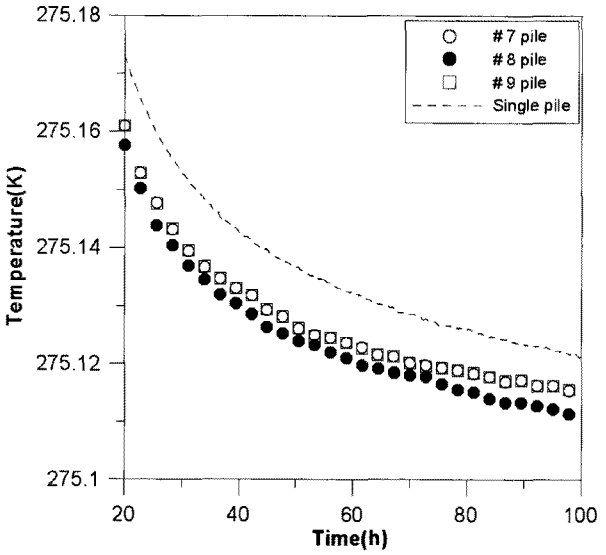
(b) 1,2,3번 파일 열교환율



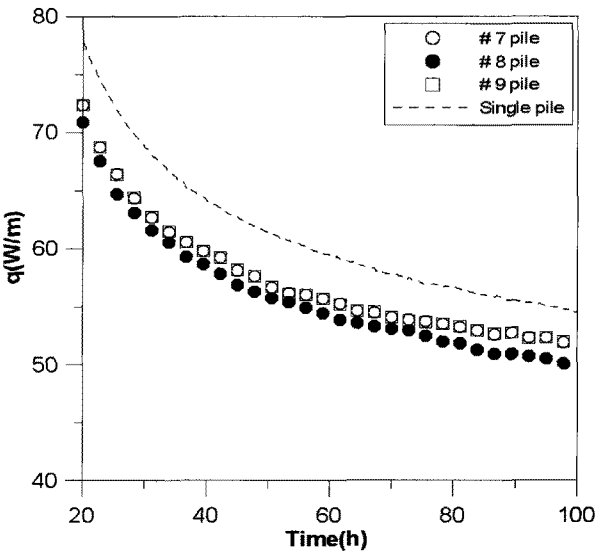
(c) 4,5,6번 파일 유출수 온도



(d) 4,5,6번 파일 열교환율

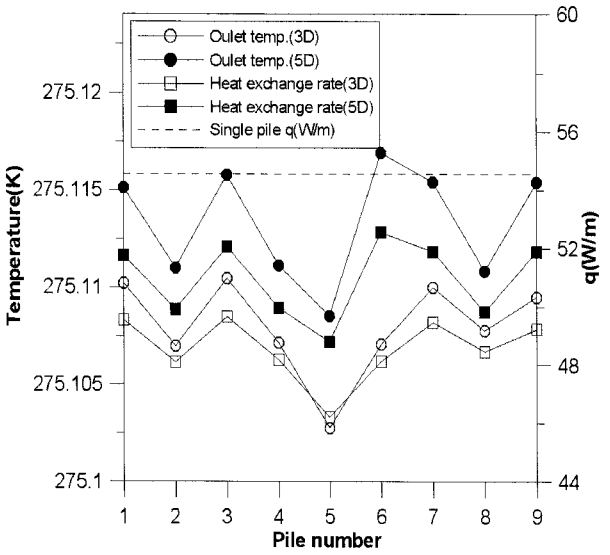


(e) 7,8,9번 파일 유출수 온도

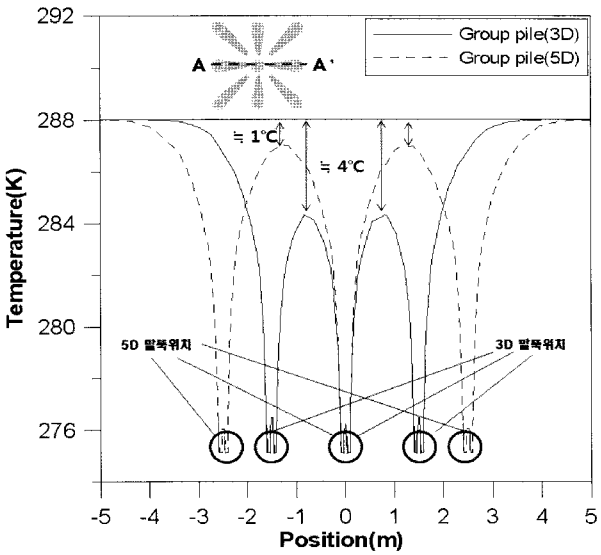


(f) 7,8,9번 파일 열교환율

그림 6. 5D(D:말뚝간격) 배치 간격에 따른 말뚝별 유출수 및 열교환율

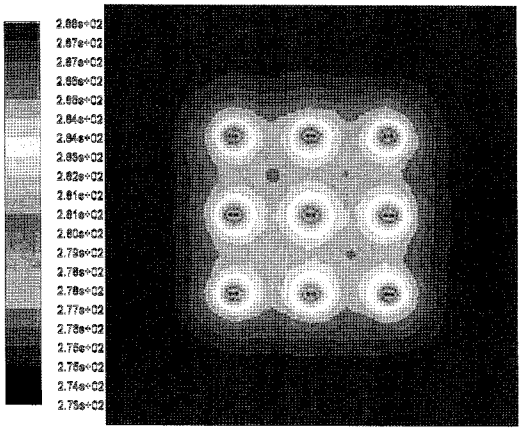


(a) 군말뚝 위치별 열교환율

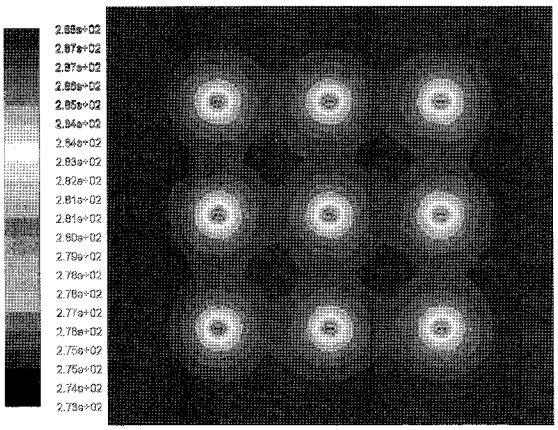


(b) 군말뚝 A-A' 온도구배

그림 7. 군말뚝 유출수온도 및 열교환율, A-A' 온도구배



(a) 군말뚝 온도구배(3D, 0.6m/s, 깊이 -19m)



(b)군말뚝 온도구배(5D, 0.6m/s, 깊이 -19m)

그림 8. 군말뚝 온도구배 Contour(100시간 운용 후)

교환될 수 있는 위치에 열교환기를 설치해야 함을 알 수 있다. 본 장에서는 위에서 설명한 여러 조건 중 열교환이 큰 동절기에 유속 0.6m/s를 대상으로 군말뚝 형태의 에너지 파일 설치 시 지열의 열적거동과 에너지 파일의 배치에 따른 효율을 분석하였다.

군말뚝 배치는 동절기 포화지반에 정사각형 모양의 독립기초로 가정하고 9개(3×3, 3D 및 5D)의 에너지 파일을 배치하였다. 말뚝 배치별로 열교환기를 설치하여 0.6m/s의 유입속도로 수치해석을 실시하였으며, 단독말뚝과 마찬가지로 20시간 이후의 유출수 온도에 대한 분석을 실시하였다. 분석결과 말뚝 배치간격 3D 및 5D간격 모두 열적 자유면이 많은 1, 3, 7, 9번 말뚝의 열효율이 가장 좋게 나타났으며, 중심부에 있는 말뚝의 열효율이 가장 작게 나타났다. 단독말뚝 대비 유출수 온도를 살펴보면 유출수의 온도는 100시간 운영 시 말뚝간격 3D는 평균 275.10K, 5D 간격은 평균 275.11K의 온도가 나타났으며, 단독말뚝의 100시간 운영 시 유출수 온도 275.12K에 비하여 유출수 온도가 낮아지는 것으로 나타났다. 열교환율은 3D 간격일 때 평균 48.5W/m, 5D 간격일 때 평균 51 W/m로 나타났으며, 단독말뚝의 열교환율 54.5 W/m 대비 3D 간격은 약 89%의 열교환율을, 5D 간격은 약 93%의 열교환율 효율을 보였다. 또한, 3D 배치간격과 5D 배치간격 비교 시 3D 배치간격에 비하여 5D 배치간격이 약 105%의 열교환율이 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 군말뚝에 열교환기 설치 시 외곽부에서는 배치간격이 넓을수록 유출수의 열교환율이 상승하는 것으로 나타났다. 그림 5, 6, 7, 8은 군말뚝의 열적거동을 나타낸다.

5. 결 론

에너지 파일은 계절별, 순환수 유속조건별 및 주변 환경에 따라 영향이 크며, 이러한 영향인자를 고려한 설계 및 현장검증이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 영향인자에 대한 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 내부 순환수의 유속이 작으면 1회 순환 시 열교환율이 상승되며, 순환수의 유속이 증가할수록 1회 순환 시 열교환율은 감소하지만 순환횟수 증가에 따라서 전체적인 열교환율은 유속이 커질수록 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 에너지 파일의 열교환율은 100시간 수치해석 결과 동절기(평균 55W/m)가 하절기(평균 47W/m) 대비 117%의 열교환율로 나타났고, 이론값은 하절기 대비 동절기의 열교환율이 129%로 높아 열교환율은 하절기 보다 동절기에 높게 나타나는 것으로 나타났다.

(3) 말뚝간격 3D 및 5D의 군말뚝 배치 시 말뚝 위치별 열효율은 열적 자유면이 많은 외곽부에서 열교환율이 좋게 나타났다. 3D 간격일 때 평균 48.5W/m, 5D 간격일 때 평균 51W/m의 열교환율로 단독말뚝의 열교환율 54.5W/m 대비 3D 간격은 약 89%의 열교환율을, 5D 간격은 약 93%의 열교환율 효율을 보였으며, 3D 간격대비 5D 간격의 평균 열교환율이 105% 상승되는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 과학기술부 (2006), 심부지열 에너지 개발 사업, 한국지질자원연구원.
2. 김도현 (2010), "지반 조건을 고려한 에너지 파일의 열전달 거동 분석", 석사학위논문, 연세대학교.
3. 박용부, 박종배, 임해식 (2007), "지열 냉난방 시스템에서 에너지 파일을 이용한 지중 열교환기 시공법", 대한토목학회지, Vol.55, No.7, pp.41-46.
4. 백성권 (2004), "중공 말뚝을 이용한 지열 냉난방 시스템 개발에 관한 연구", 박사학위논문, 부산대학교.
5. 산업자원부 (2006), 고성능 저가하여 지중열교환기 개발 연구보고서, 코오롱건설(주).
6. 송진영 (2011), "PHC 에너지 파일의 열적 및 구조적 특성 연구", 석사학위논문, 연세대학교.
7. Bose, J. E., J. D. Parker, and F. C. McQuiston (1985), "Design/data manual for closed-loop ground-coupled heat pump system", Atlanta: ASHRAE.
8. Charles P. Remund (1999), "Borehole Thermal Resistance: Laboratory and Field Studies", ASHREA CH-99-2-1.
9. Environmental Protection Agency (1993), Health Effects of Passive Smoking : Lung Cancer and Other Disorders.
10. Fluent Inc. (2006), User's Guide in Flunet 6.3.26.
11. Liu Jun, Zhang Xu, Gao Jun, Yang Jie. (2009). "Evaluation of heat exchange rate of GHE in geothermal heat pump system." Renewable Energy 34, pp.2898-2904.
12. Bourne-Webb, B. Amatya, K. Soga, T. Amis, C. Davidson, P. Payne (2009), "Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles", Geotechnique, Vol.59, Issue 3, pp.237-248.
13. Yasuhiro Hamada, Hisashi Saitoh, Makoto Nakamura, Hideki Kubota, Kiyoshi Ochifuji. (2007). "Field performance of an energy pile system for space heating", Energy and Buildings 39, pp.517-524.

(접수일자 2011. 4. 12, 심사완료일 2011. 7. 29)