

에너지 파일의 열교환 효율 및 성능, 열응력에 의한 역학적 거동 평가

민선홍*, 이철호*, 박문서*, 고희선**, 최항석*[†]

*고려대학교 건축사회환경공학부, **삼성물산주식회사

Numerical Study of Heat Transfer Efficiency, Performace and Mechanical Behavior induced by Thermal Stress of Energy Pile

Sunhong Min, Chulho Lee, Moonseo Park, Hyungseon Koh, Hangseok Choi[†]

*School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

**Samsung C&T Corporation, 137-956, Korea

Abstract

The ground source heat pump system is increasingly being considered as an alternative to traditional heating and cooling systems to reduce the emission of ground house gases. In this paper, A series of numerical analysis for energy piles has been performed focusing on heat transfer efficiency, performance and thermal stress. Results of numerical analyses for the W-shape type shows more efficient heat exchange transfer than the coil type. From results of the thermo-mechanical analysis, it is shown that the concentration of thermal stress occurs around the circulating pipe and the interfaces between different materials. The largest deformation caused by thermal stress is observed in the energy pile.

Key words : Energy pile(에너지 파일), Heat transfer(열전달), Thermal stress(열응력), EWT(열교환 파이프 유출구 온도), W-shape type(W-형), Coil type(나선형)

기 호 설 명

- k_s : 유효 열전도도
- Q : 단위시간당 주입 열량
- m : 시간에 따른 유입, 유출수의 평균온도 기울기
- L : 지중열교환기 길이

그리스 문자

- σ_v : Von mise stress
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 주응력

1. 서 론

현재 국내외에서 화석연료의 고갈, 온실가스 감축 등의 현안 문제를 해결하기 위해 신재생에너지 개발 및 보급에 큰 관심이 모아지고 있다. 지열에너지는 재생에너지로 비 고갈성이며 환경 친화적 에너지이다. 이러한 지열에너지에 관한 연구

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3326, Fax: +82-2-928-7656

E-mail: hchoi2@korea.ac.kr

접수일 : 2010년 11월 1일

심사일 : 2010년 11월 8일

채택일 : 2010년 11월 10일

는 주로 수직 밀폐형 지중열 교환기에 관하여 연구되어 왔으나 지중열교환기 시공을 위해 천공비와 같은 많은 초기투자비가 필요하여 지열에너지의 보급에 부담으로 작용하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존 건설공사에 사용되는 기초 구조물을 지중열교환기로 적용하고자하는 연구가 이루어지고 있다(백성권^[1], 유형규^[2], Hamada et al^[3], Nam et al^[4], Gao et al^[5], Jun et al^[6], Man et al^[7]). 에너지 파일이란 건물기초에 세워지는 콘크리트 말뚝내부에 열교환 파이프를 설치하고 파이프 내부 유체를 순환시켜 지열에너지를 활용하는 방식으로 기존 건축물의 기초로 사용되는 말뚝에 지반의 열에너지를 축적하여 기초부재의 지지능력과 콘크리트의 높은 열에너지 축적 능력을 동시에 활용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 국내 지열에너지에 대한 연구는 대부분 수직 밀폐형 지중열교환기에 집중되어 있으며, 에너지 파일에 대한 연구는 미미한 실정이다. 특히 에너지 파일 순환 파이프와 말뚝간의 열적단락 및 냉난방 순환에 의한 말뚝 자체의 지지력 변화에 대한 평가나 설계방법 등에 대한 선행연구가 전무한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 국내 공동주택에서 주로 사용하는 PHC 파일을 지중열교환기로 이용하여 열교환 파이프의 형태에 따른 W-형과 나선형 열교환 파이프의 효율을 3차원 유한체적해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 비교하였으며, 현장 타설 말뚝에 적용한 W-형 열교환기의 성능평가는 FLUENT를 이용하여 실시하였고, 순환 파이프로부터 열전달에 의해 발생하는 파일 내 열응력 및 역학적 거동은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS-2D를 이용하여 평가하였다.

2. 에너지 파일의 열교환 효율평가

2.1 PHC 파일을 이용한 에너지 파일의 현장 열응답 시험 모사

PHC 파일을 이용한 에너지 파일의 열교환 효율을 평가하기 위해서 FLUENT를 이용하여 열교환 파이프 길이가 거의 동일한 W-형(24.28m)과 나선형(24.32m) 지중열 교환기의 현장 열응답 시험을 모사하였다. 해석단면은 그림 1과 같이 지중

에 6m 깊이로 매설한 두께 80mm, 외경 500mm의 PHC 파일 내부에 외경 25mm의 HDPE 파이프가 매설된 형태의 단면으로 가정하였고, PHC 파일 내부 HDPE 파이프를 제외한 부분을 시멘트 그라우트를 뒤채움재로 가정하였다.

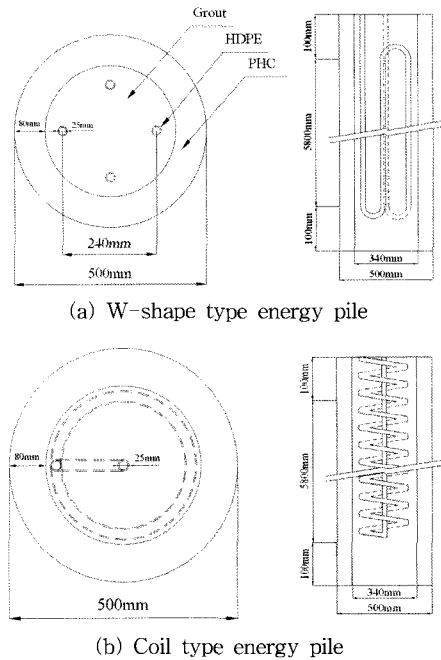


Fig. 1 Schematic of PHC energy pile

해석에 적용한 지반, 뒤채움재, PHC 파일 및 파이프의 물성치는 표 1에 나타나었고, Allan and Philippacopoulos^[8]이 제시한 물성치와 Enginee-

Table 1 Parameters of numerical analysis

	Ground	PHC pile	Grout	HDPE pipe
Density (kg/m ³)	2100	2700	3640	955
Specific Heat (J/kg·K)	1300	790	840	525
Conductivity (W/m·K)	2.5	1.62	2.02	0.4
Young's Modulus (kg/m ²)	2×10 ⁷	1.4×10 ⁸	1.38×10 ⁸	1.4×10 ⁷
Poisson's Ratio	0.33	0.2	0.21	0.45
Expansion (m/m·K)	1.65×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1.65×10 ⁻⁵	2.16×10 ⁻⁴

ing tool box^[9]에서 제시한 물성치를 적용하였다. 에너지 파일 해석에는 유입수와 유출수의 온도차를 2°C로 적용하여 수행하였고, 순환유체와 지반의 초기온도는 15°C를 적용하였다.

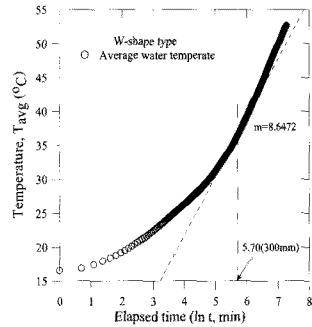
2.2 PHC 파일을 이용한 에너지 파일의 현장 열응답 시험 모사 결과

현장 열응답 시험은 일정시간 이상 열교환을 수행하여 열교환 수행시간을 자연로그 값으로 변환한 후 순환유체의 평균온도와의 기울기를 구하고, 구해진 기울기를 식(1)의 라인소스 모델을 적용하여 에너지파일과 지반의 유효 열전도도를 구하는 목적을 가지고 있다. 본 연구에서는 FLUENT를 이용한 현장 열응답 시험을 모사하여 그림 2의 온도 분포와 그림 3의 결과를 도출하였고, 기울기가 일정하게 수렴하는 5시간(300분) 이후의 결과를 이용해 유효 열전도도를 계산하였다.

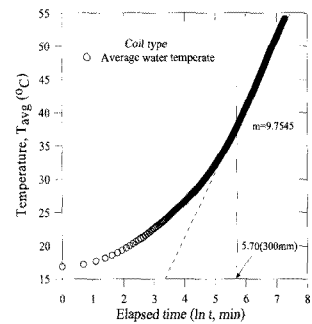
$$k_s = \frac{Q}{4 \times \pi \times m \times L} \quad (1)$$

라인소스 모델을 적용한 유효 열전도도는 W-형 지중열교환기인 경우 1.53 W/mK, 나선형 지

중열교환기인 경우 1.36 W/m로 측정되었다. 동일한 열교환 파이프 길이에서는 열교환 파이프 간의 간격이 넓어 열 간섭 영향을 적게 받는 W-형 지중열교환기가 나선형 지중열교환기에 비하여 열교환 효율이 높은 것으로 평가되었다.



(a) W-shape type energy pile

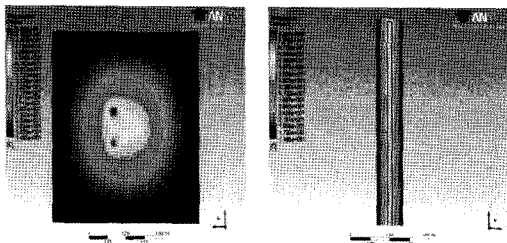


(b) Coil type energy pile

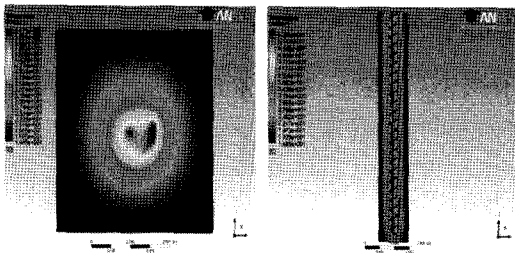
Fig. 3 Numerical analysis results of in-situ thermal response test

2.3 현장 타설 말뚝을 이용한 에너지 파일의 성능 평가 모사

현장 타설 말뚝을 이용한 에너지 파일의 성능 평가는 FLUENT를 이용하여 수행하였고, 전 절의 수치해석 결과 열교환 효율이 상대적으로 높은 W-형 열교환기에 대하여 수행하였다. 수치해석에 이용된 에너지 파일은 그림 4과 같이 지중에 20m 깊이로 매설된 직경 1.5m의 현장타설 말뚝에 25mm의 HDPE 파이프가 매설된 형태의 단면으로 가정하였고, 가로 26m, 세로 20m의 지반에 5m 간격의 에너지 파일이 시공된 형태로 가정하였다.



(a) W-shape type energy pile



(b) Coil type energy pile

Fig. 2 Temperature distribution of numerical analysis

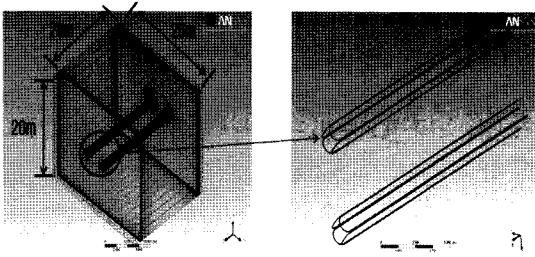


Fig. 4 Schematic of in-situ energy pile

수치해석에 사용한 물성치는 앞 절에서 이용한 표 1의 물성치를 동일하게 사용하였으며, 지반의 온도는 15°C, 순환수의 유속은 0.6 m/s, 열교환기 유입온도는 30°C로 가정하여 해석하였다.

2.4 현장 타설 말뚝을 이용한 에너지 파일의 성능 평가 모사 결과

지중열교환기의 성능은 지중열교환기의 용량, 순환수의 특성 및 유량, 열교환 파이프의 길이, 지반조건 등의 요소에 영향을 받는다. 지중열교환기의 성능 향상을 위해서는 위의 요소들에 대한 연구가 필요하다. 지중열교환기의 성능에 영향을 미치는 요소 중 지중열교환기의 출구온도(EWT)는 지중열교환기의 성능에 가장 큰 영향을 미치는

요소 중 하나이다. 지중열교환기의 냉방과정 중 높은 EWT와 난방과정 중 낮은 EWT로 설계 시 지중열교환기의 성능을 저하시키게 된다. 이에 본 논문에서는 지중열교환기의 유입온도를 30°C로 고정하고 8시간 동안 지중열교환기를 가동시킨 후 16시간 동안 운영을 중지시킨 경우에 대하여 그림 5의 지중열교환기의 온도분포와 그림 6과 같이 8시간의 운영기간동안의 EWT의 변화에 대한 수치해석을 실시하였다.

일반적인 지열 냉난방 시스템에서 지중열 교환기로 유입되는 순환유체의 온도와 EWT는 5~6°C의 온도 차이를 보이며, 수치해석결과 8시간 운영 후의 EWT는 약 24°C로 일반적인 지열 냉난방 시스템의 설계조건에 부합되는 결과를 얻었다.

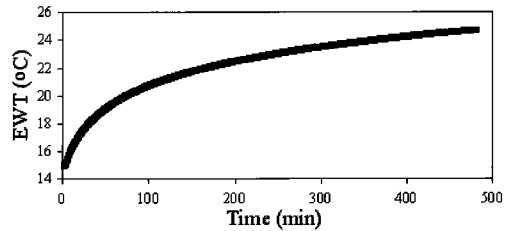
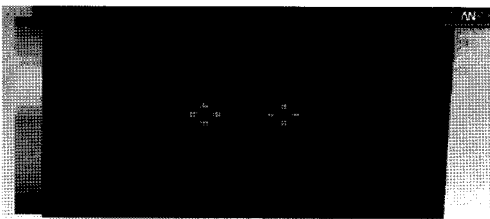


Fig. 6 The change of the EWT operating hours to 8 hours

3. 열교환에 의한 열응력 평가

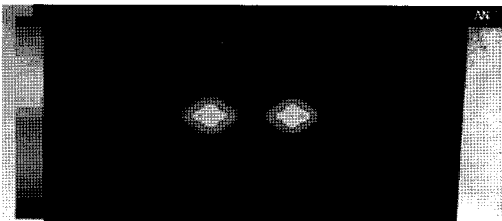
3.1 에너지 파일의 열응력 해석

에너지 파일에서 순환 파이프로부터 열교환에 의한 파일 내 열응력과 이로 인한 역학적 거동을 평가하기 위해 ABAQUS를 이용하여 2차원 단면의 온도분포와 열응력에 의해 발생하는 응력분포, 변위에 대하여 분석하였다. 해석 단면은 그림 7과 같은 지중에 설치된 두께 80mm, 외경 500mm의 PHC 파일 내부에 두께 5mm, 외경 80mm의 두 가닥의 HDPE 파이프가 매설된 형태의 단면으로 가정하였고, PHC 파일 내부 HDPE 파이프를 제외한 부분을 시멘트 그라우트를 뒤채움재로 가정하였다. 해석에 적용한 지반, 뒤채움재, PHC 파일 및 파이프의 물성치는 표 1의 FLUENT 열교환 해석에서 적용한 물성



Contours of Static Temperature (K) (Time=2.5600e+04) ANSYS FLUENT 12.1 (3d, pbns, sbs, transient) Oct 09, 2010

(a) 8 hours operation



Contours of Static Temperature (K) (Time=5.6400e+04) ANSYS FLUENT 12.1 (3d, pbns, sbs, transient) Oct 09, 2010

(b) 16 hours operating stop

Fig. 5 Temperature distribution with time

치와 동일하게 적용하였으며, 지반의 온도는 12°C, 냉방과정 시 유동액의 유입온도 25°C, 난방과정 시 유동액의 유입온도 5°C를 적용하였다.

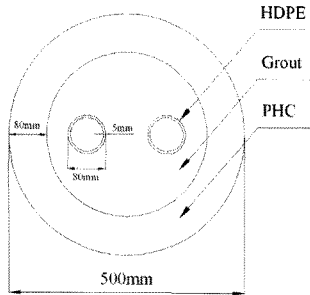


Fig. 7 Schematic of energy pile for thermal stress analysis

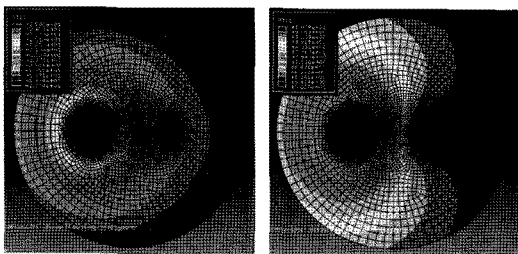
3.1 에너지 파일의 열응력 해석

열전달 해석 결과 및 열응력 해석결과를 그림 8과 표 2에 나타내었다. 열응력 해석 결과는 Von mise stress로 나타내었다.

Von mise stress, σ_v 는 식 (2)과 같이 표현된다.

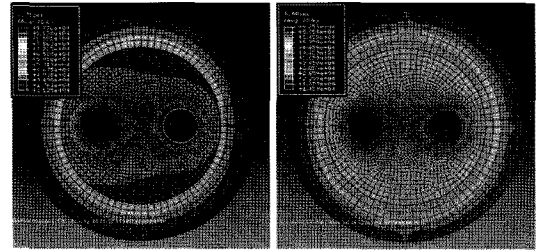
$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2)$$

그림 8과 표 2에서 확인할 수 있듯이, 냉방과정 및 난방과정의 해석 결과 모두 열교환 파이프 주변의 뒤채움재와 각각의 부재의 접합부에서 열응력이 집중되었고, 열응력에 의한 변위의 분포는 PHC 파일 주변에 집중되었으며, 뒤채움재는 냉방과정에서는 팽창하고, 난방과정에서는 수축하는 것으로 관찰되었다.



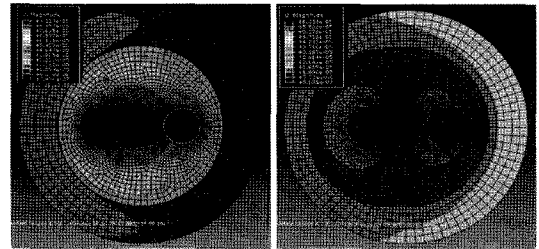
(a) Temperature distribution of cooling process

(b) Temperature distribution of heating process



(c) Stress distribution of cooling process

(d) Stress distribution of heating process



(e) Displacement of cooling process

(f) Displacement of heating process

Fig. 8 Numerical analysis results

Table 3 Numerical analysis results

		Cooling process	Heating process
Temperature distribution (°C)	maximum	25	10
	minimum	17.74	5
Stress distribution (kg/m ²)	maximum	9.776×10 ⁴	6.259×10 ⁴
	minimum	2.125×10 ⁴	1.459×10 ⁴
Displacement (m)	maximum	9.219×10 ⁻⁵	6.324×10 ⁻⁵
	minimum	7.496×10 ⁻⁷	5.071×10 ⁻⁷

4. 결론

토목 및 건축공사에 사용되는 기초구조물을 이용한 지중열 교환기는 초기 투자비 절감 및 시공성 향상의 장점이 있어, 에너지 파일에 대한 관심이 증가하고 있다. 에너지 파일을 이용한 지중열 교환기의 활용을 위해서는 에너지 파일의 열교환 파이프 형태에 따른 열교환 효율 및 성능 평가, 열전달에 의해 발생하는 역학적 거동에 대한 분석이 필요하다. 본 논문은 수치해석 프로그램인 FLUENT와 ABAQUS를 이용하여 에너지 파일

의 열교환 파이프 형태에 따른 열교환 효율 분석과 열전달에 의한 역학적 거동평가를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) PHC 파이프에 적용한 에너지 파이프의 동일한 열교환 파이프 길이에서는 파이프 간의 간격이 넓어 열 간섭의 영향을 적게 받는 W-형 열교환기가 나선형 열교환기에 비하여 열교환 효율이 높은 것으로 해석되었다.
- (2) 현장타설 말뚝에 적용한 에너지 파이프의 성능 평가 결과 주입온도 30°C에 대한 8시간 운행 후의 EWT는 약 24°C로 일반적인 지열냉난방시스템의 설계조건에 부합되는 결과를 얻었다.
- (3) 에너지 파이프 내부의 열전달에 의해 발생하는 역학적 거동 해석결과 열교환 파이프 주변의 뒤채움재와 각각 부재의 접합부에서 열응력이 집중되는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 에너지 파이프에 발생하는 열응력과 재료적 성질에 의해 발생하는 말뚝의 변위는 에너지파이프의 주변에 집중되고, 뒤채움재는 냉방과정에서는 팽창하고 난방과정에서는 수축하는 것으로 관찰되었다.
- (5) 본 논문에서 수행한 수치해석은 지하수, 외기온도 등의 에너지파이프 외부조건에 대한 고려가 부족하여 실제 현장조건에서의 실험결과와 차이가 발생할 수 있다. 따라서 정확한 수치해석 결과를 도출하기 위해서 대상 현장의 지하수 조건, 외기온도 조건 등에 대한 연구와 이를 적용한 수치해석이 필요하다 판단된다.

후 기

본 연구는 삼성물산과 2010 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(#2010-0011159).

참고문헌

1. 백성권, 2004, 중공 말뚝을 이용한 지열 냉난방 시스템 개발에 관한 연구, 박사학위논문, 부산대학교
2. 유형규, 2008, PHC 파이프 기초를 이용한 지중 열교환기 개발 및 성능 평가, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 28, No. 5, pp. 56-64.
3. Yasuhiro Hamada, Hisashi Saitoh, Makoto Nakamura, Hideki Kubota, Kiyoshi Ochifuji, 2007, Field performance of an energy pile system for space heating, Energy and Building, Vol. 39, pp.517-524.
4. Yujin Nam, Ryoza Ooka, Suckho Hwang, 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.
5. Jun Gao, Xu Zhang, Jun Liu, Kuishan Li, Jie Yang, 2008, Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: An application, Applied Energy, Vol. 85, pp. 901-910.
6. 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.
7. Yi Man, HongXing Yang, Nairen Diao, Junhong Liu, Zhaohong Fang, 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.
8. BLN ,2000, BNL Greut Formula Revives NJ Heat Pump Industry, Wins Award, Brookhaven Bulletin, Vol. 54 No.23
9. Engineeringtoolbox.com, 2005