

## 열전달 매질을 고려한 에너지파일의 열전달 거동 분석

### Heat Transfer Analysis of Energy Pile Considering heat transfer medium

김도현<sup>1)</sup>, Do-Hyun Kim, 정상섭<sup>2)</sup>, Sang-Seom Jeong, 송진영<sup>3)</sup>, Jin-Young Song

<sup>1)</sup> 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

<sup>2)</sup> 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

<sup>3)</sup> 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

**SYNOPSIS :** In this study, a series of thermal numerical analysis was conducted through the ground condition and the length and shape of the energy pile. In order to investigate the effect of the thermal properties of ground condition, grout and pile type on heat transfer efficiency in the U-type heat exchanger in energy pile, thermal numerical analysis was done by using ABAQUS. ABAQUS, a finite element analyzing program, was employed to evaluate the temperature distribution on the cross section of energy pile system incorporating HDPE - grout - pile - Ground condition which consists of clay, sand, rock type soil and ground water.

**Keywords :** energy pile, heat exchanger, heat transfer, ABAQUS, ground condition

## 1. 서론

지중열교환기가 구조물의 기초파일 안에 들어가기 때문에 기초파일의 형태와 구조물이 위치한 지반조건, 뒷채움재 등의 재료에 따른 열전달 효율이 달라지며 열용량 파악과 전체 시스템에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 지중열교환기의 열전달 거동에 대한 연구와 열효율 향상에 대한 많은 연구가 필요하며, 여러 지반조건과 열전달 매질에 따른 영향 파악이 필요하다.

본 연구에서는 에너지 파일의 형태와 깊이, 열전달 매질과 지반조건 등에 따른 열전달 거동을 2차원 유한 요소 해석 및 3차원 유한 체적 해석을 통해 파악하였다. 에너지파일 내부에 들어가는 열교환기의 형태는 U형, Double-U형, 복수정형, 나선형 등 여러 형태가 있지만, 일반적으로 사용되는 U자 형태에 대한 열전달 거동의 해석을 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 통해 실시하였다. 지반 조건은 Clay, Sand, Rock 지반과 지하수에 의한 포화여부를 고려하여 열전달 거동을 파악하였고, 사용된 말뚝의 종류는 PHC, 강관, 동관 말뚝 가정하여 해석하였다. 에너지 파일에 사용되는 뒷채움재는 여러 종류가 있지만 그 중 일반적으로 많이 사용되는 시멘트와 벤토나이트 그라우트를 가정하였다. 여름철 냉방의 경우 지반은 12 °C로 두고, 열교환기인 밀도 폴리에틸렌 파이프(HDPE)의 경계조건은 25°C를 주었다. 겨울철 난방의 경우는 지반은 12 °C, HDPE관은 2 °C로 가정하였다. 지반조건과 매질에 따른 36 Case의 조건을 냉·난방에 따라 경계조건의 온도를 달리하여 총 72 Case의 수치해석을 실시하였다. ABAQUS 2차원 유한요소해석을 통해 여러 지반조건과 열전달 매질에 따른 열전달 영향 파악하는데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 지반조건을 고려한 에너지파일의 수치해석

### 2.1 수치적 모델링 및 해석

에너지 파일의 지반조건에 따른 열전달 거동과 열용량 분포에 대해 알아보기 위하여 유한 요소 해석

프로그램인 ABAQUS를 통해 에너지 파일의 2차원 단면 유한 요소 해석을 실시하였다. 실제 현장에서 사용되고 있는 에너지 파일의 규격을 통해 모델링을 하였으며 다양한 지반조건과 그라우트 재료, 말뚝의 종류에 따른 열전도 효과를 파악하였다.

### 2.1.1 에너지 파일 모델링

지반 조건은 점토와 모래, 암반에 대해, 그리고 지하수에 의한 포화여부를 고려하였고, 말뚝은 PHC, 강관, 동관에 대해, 뒷채움재는 시멘트와 벤토나이트로 각 열전도체의 차이에 대한 영향을 파악하였다.

말뚝의 직경은 500 mm이며, PHC의 두께는 80 mm, 강관과 동관의 두께는 10 mm를 사용하였으며, 말뚝의 내부에 관입된 HDPE관의 직경은 70 mm, 그 두께는 5 mm이다. 주변 지반은 가로 2500 mm, 세로 2500 mm로 주어 열원으로 인한 영향을 정확히 파악하기 위하여 넓게 모델링 하였다. 그림 2.1은 PHC 말뚝과 강관, 동관의 ABAQUS 모델링이다.

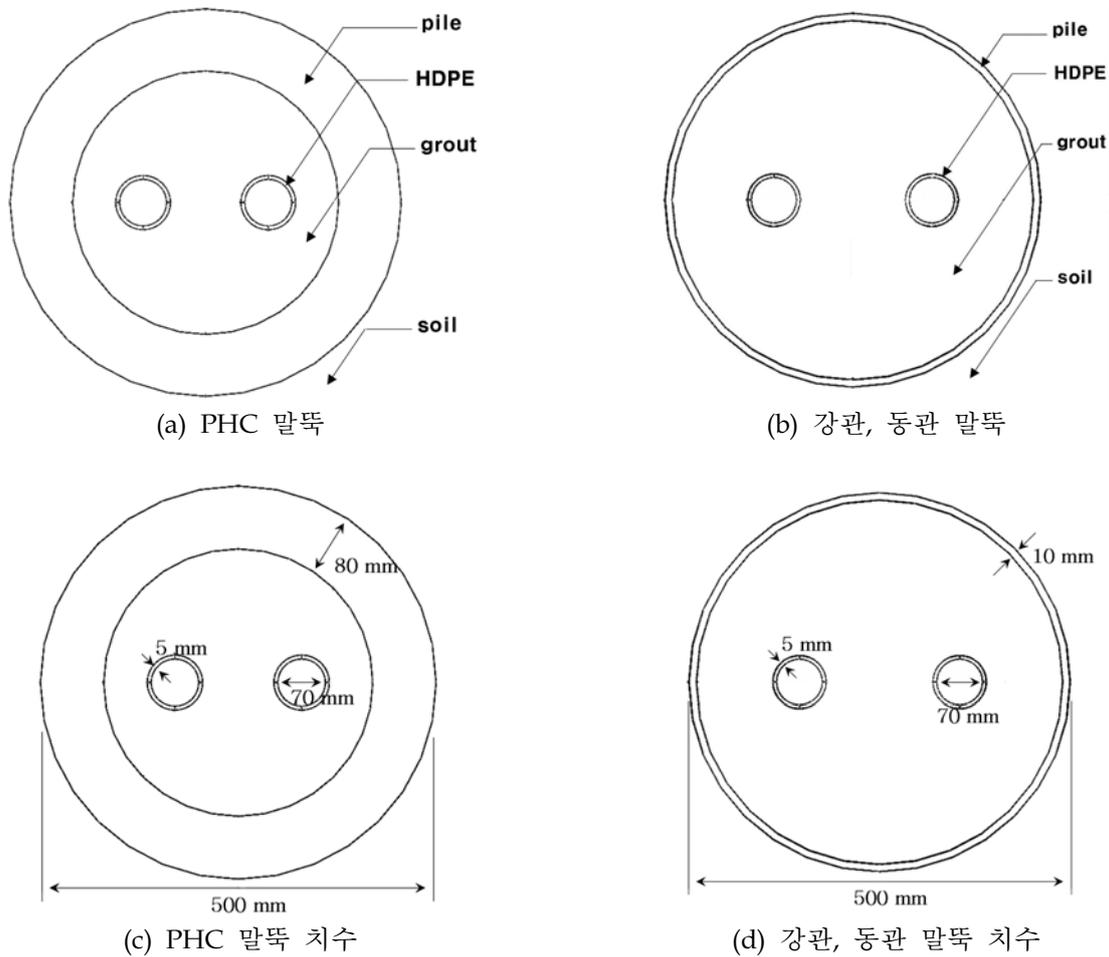


그림 2.1 PHC, 강관, 동관의 ABAQUS 모델링

### 2.1.2 유한 요소 Mesh와 경계 조건

에너지 파일의 수직단면에서 지반의 온도를 12℃로 주었으며, 겨울철 난방은 HDPE관의 경계조건은 2℃로, 여름철 냉방은 경계조건을 25℃로 주어 해석을 하였다. 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS를

사용한 에너지 파일의 열전달거동 해석 시, 지반의 일정한 온도와 열원인 열 교환 파이프에서의 온도 분포를 모사하기 위하여 Step을 2개로 나누어 해석하였다. Step 1에서는 지반에만 12℃의 경계조건을 주어 말뚝 내부로 12℃의 온도가 전달 되도록 하였으며, Step 2에서는 열 교환 파이프인 HDPE관에 25℃ 또는 2℃의 경계조건을 주어 2개의 Step으로 나누어 해석하였다. 그림 2.2는 에너지 파일 열전달 해석을 하기 위해 나눈 유한 요소 Mesh이며, 냉·난방에 따른 경계조건은 그림 2.3과 같이 주었다.

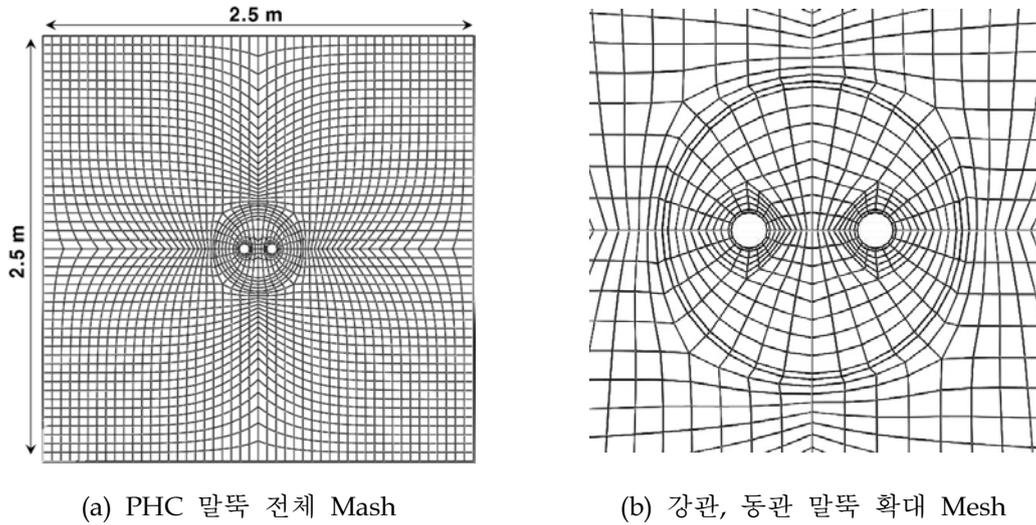


그림 2.2 에너지 파일 유한 요소 Mesh

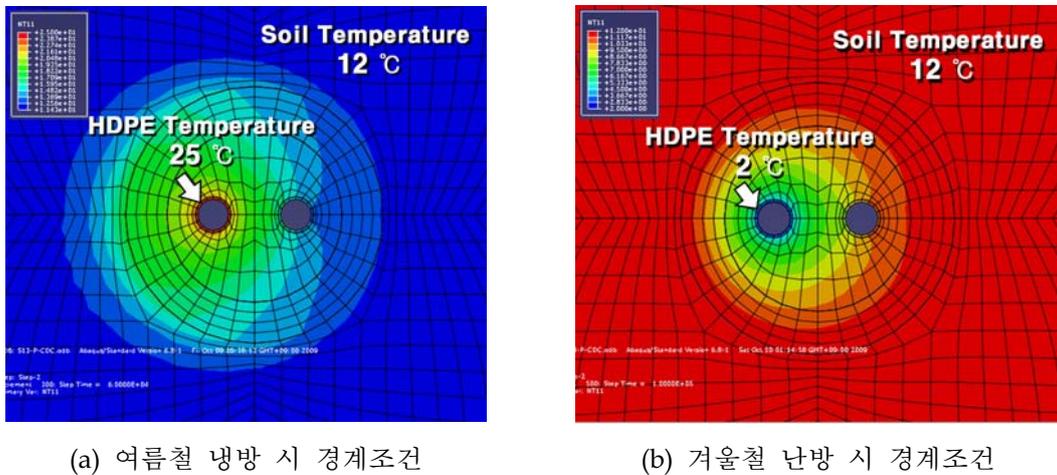


그림 2.3 냉·난방에 따른 해석 경계조건

### 2.1.3 해석에 사용된 물성치

수치해석에는 열전달물질의 물성치를 달리하여 실시하였으며, 표 2.1은 유한 요소 해석에 사용된 말뚝과 열교환 파이프인 HDPE관의 열적 물성치를 나타낸 것이다. 지반을 구성하는 토사의 종류와 지하수에 의한 포화여부에 따른 물성치는 일반적인 값을 사용하였으며 표 2.2와 같다. 시멘트와 벤토나이트 뒷채움재의 열적 물성치는 표 2.3의 값을 사용하였다.

에너지 파일의 수직 단면의 2차원 유한 요소 해석을 위한 수차해석을 다음 표 3.4와 같은 Case에 따라 실시하였다. 지반은 계절에 상관없이 일정한 온도이므로 경계조건을 냉·난방 관계없이 12℃로 주었으며, 겨울철 난방은 HDPE관의 경계조건을 2℃로, 여름철 냉방은 경계조건을 25℃로 주어 해석을 실시하여 36 Case에 여름과 겨울의 냉·난방 온도를 고려하여 총 72 Case를 수치 해석 하였다.

표 2.1 유한 요소 해석에 사용된 말뚝과 열교환기의 물성치 (Engineeringtoolbox, 2005)

Material Information	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (J/kg·k)	Conductivity (W/m·k)
PHC	2700	790	1.62
Steel pile	7900	500	50.2
Copper pile	8940	385	401
HDPE	955	525	0.4

표 2.2 유한 요소 해석에 사용된 지반의 물성치 (Engineeringtoolbox, 2005)

Material Information	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (J/kg·k)	Conductivity (W/m·k)	
Clay	불포화	1800	920	0.18
	포화	2100	1300	2.5
Sand	불포화	1600	800	0.25
	포화	1900	1400	4
Rock (Sandstone)	불포화	2100	950	1.7
	포화	2400	1480	4.8

표 2.3 유한 요소 해석에 사용된 뒤틀개흙재의 물성치 (Engineeringtoolbox, 2005)

Material Information	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (J/kg·k)	Conductivity (W/m·k)
Bentonite Grout	1580	380	0.9
Cement Grout	3640	840	2.02

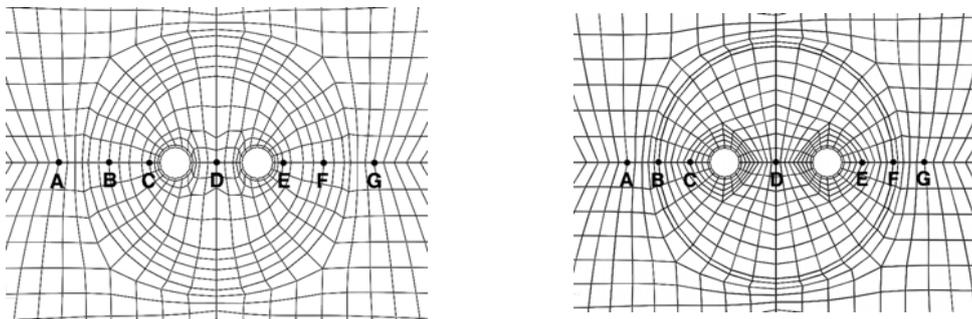
### 3. ABAQUS를 통한 2차원 유한 요소 열전달 해석 결과

#### 3.1 시간의 흐름에 따른 수직 단면의 열전달

에너지 파일 수직 단면의 열전달을 살펴보기 위해 ABAQUS를 통해 2차원 유한 요소 열전달 해석을 실시하였다. ABAQUS 해석 Step에 따른 온도 변화를 그림 3.1와 같이 말뚝의 중심을 가로 지르는 직선

상의 7지점을 지정하여, 그림 3.2와 같이 그래프로 나타내었다. 말뚝의 종류에 따른 물성치를 달리하여 해석을 실시하였고, 나머지 뒷채움재나 지반 조건에 대해서는 조건을 통제하여, 말뚝 종류에 따른 각 지점에서의 시간에 따른 온도변화를 알 수 있도록 하였다.

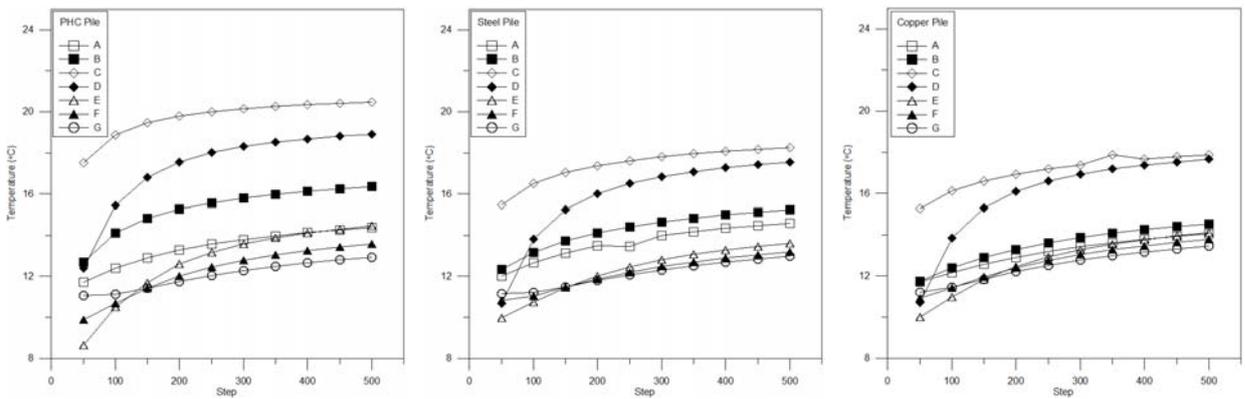
ABAQUS 2차원 유한 요소 해석을 통해 얻은 결과에서 열원으로부터 열이 소산되는 속도 즉, 그래프의 기울기와 수렴하는 온도를 통해 열전달 거동을 살펴볼 수 있다. 점 C와 D는 열원에서 가장 가까운 지점으로 열이 소산 되는 과정이 뚜렷이 확인 할 수 있다. PHC 말뚝의 경우 C점과 D점의 온도가 강관이나 동관보다 높으며 C와 D의 온도차도 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 강관과 동관에 비해 열을 빨리 소산시키지 못하여 열원으로 부터의 열이 아직 가까운 지점에 머물러 있으며, C와 D의 온도차가 큰 점과 기울기가 비교적 작은 것으로 보아 열을 전달하는 속도가 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 그래프의 기울기와 온도를 비교 하였을때 열을 소산시키는 속도가 동관, 강관, PHC 말뚝 순을 알 수 있었다.



(a) PHC 말뚝

(b) 강관, 동관 말뚝

그림 3.1 ABAQUS의 해석 Step에 따른 말뚝의 온도 측정 지점



(a) PHC 말뚝

(b) 강관 말뚝

(c) 동관 말뚝

그림 3.2 말뚝종류에 따른 각 지점의 해석 Step별 온도 변화

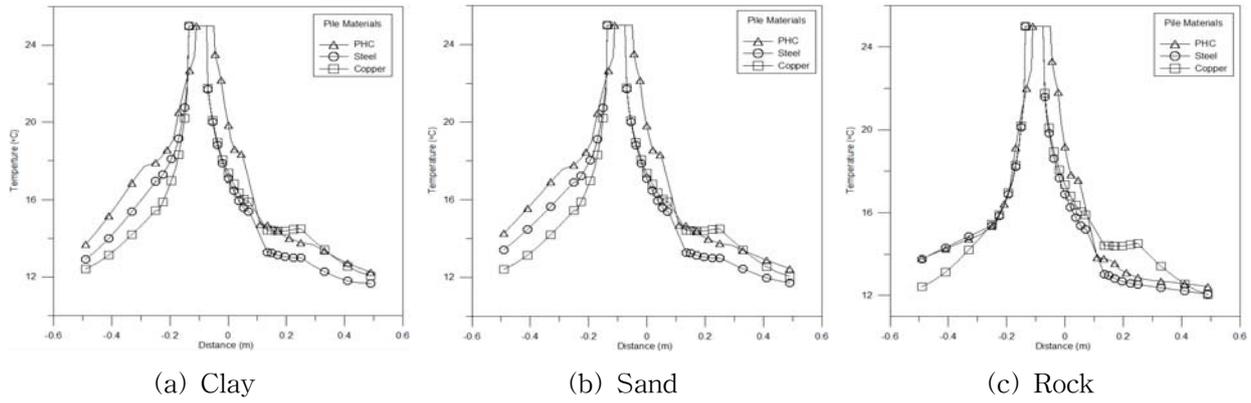


그림 3.3 각 지반조건에서 말뚝종류에 말뚝 내부 온도 변화

### 3.2 말뚝의 종류에 따른 열전달 거동

에너지 파일은 말뚝 내부의 빈 공간에 열교환기를 삽입하는 형식으로 내주 공간의 확보가 가능한 PHC, 강관, 동관, 현장타설 말뚝, 지하 연속벽 등 지하구조물의 대부분에 적용이 가능하다. ABAQUS를 통한 2차원 유한 요소 해석에서는 PHC와 강관, 동관에 대한 해석을 실시하였다. 에너지 파일에 사용된 PHC, 강관, 동관 말뚝에 따른 열전달 영향을 파악하기 위하여 같은 지반 조건에서 말뚝의 종류를 달리 하여 열전달 거동을 파악하였다. 그림 3.3은 지하수의 영향을 받지 않은 토사와 시멘트 뒷채움재로 조건을 통제하여 Clay, Sand, Rock에서의 말뚝 종류의 영향을 알아보았다. 같은 지반 조건일 때 말뚝의 차이에 의한 열전달을 비교해 보면 동관, 강관, PHC 순으로 열전달이 잘되며, 말뚝의 중심에서부터의 거리가 짧을 때에도 온도가 잘 전달되고 있음을 확인하였다. 어떤 말뚝이든 Rock에서는 열전달이 잘되어 말뚝 종류에 상관없이 비슷한 형태를 보인다.

### 3.3 뒷채움재에 의한 열전달

에너지 파일의 내부 빈 공간을 채우는 뒷채움재는 균열이나 지하수 침투, 지표면의 오염물질의 유입을 막기 위해 투수계수가 낮은 것을 사용하며 열교환 파이프를 순환하는 유동액의 열을 주변 토양층이나 암반층으로 전달시키는 역할을 하고 있다. 에너지 파일과 지중열교환기에 사용되는 뒷채움재는 여러 가지가 있지만, 흔히 사용되는 시멘트 그라우트와 벤토나이트 그라우트를 사용하여 해석을 실시하였다. 일반적으로 사용되는 시멘트 그라우트는 벤토나이트에 비해 열전도도가 크지만 건조 시 건조수축으로 인한 균열로 열손실을 가져올 수 있다. 벤토나이트 그라우트는 열전도도는 시멘트 그라우트에 비해 떨어지지만 함수비에 따라 팽창을 하는 성질이 있어 말뚝내의 균열이나 빈 공간을 채워주는 역할을 할 수 있다.

그림 3.4는 지반조건이 Clay일때 말뚝 종류를 다르게 하여 시멘트와 벤토나이트 뒷채움재의 열전달을 비교한 그래프이다. 시멘트 그라우트가 벤토나이트 그라우트에 비해 그래프의 기울기가 더 급하며, 열을 빨리 주변으로 소산시켜 온도가 낮다. 하지만, 앞서 살펴본바와 같이 Rock 지반에서는 전체적으로 열전도율이 좋아 큰 차이를 보이지 않지만, 뒷채움재가 있는 중심으로부터 반경 0.25m 내의 말뚝내부에서는 온도차가 발생하였다.

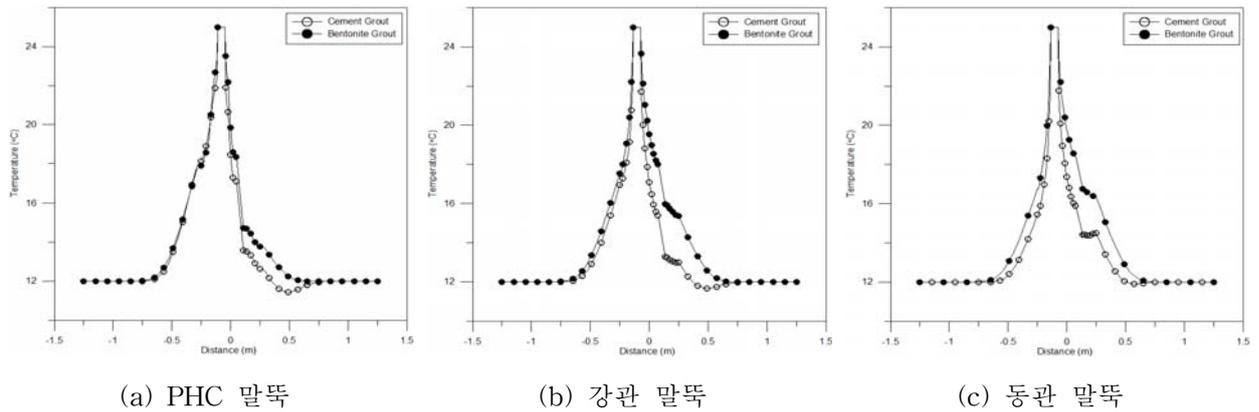


그림 3.4 지반조건이 Clay일때 말뚝 종류에 따른 뒷채움재의 열전달

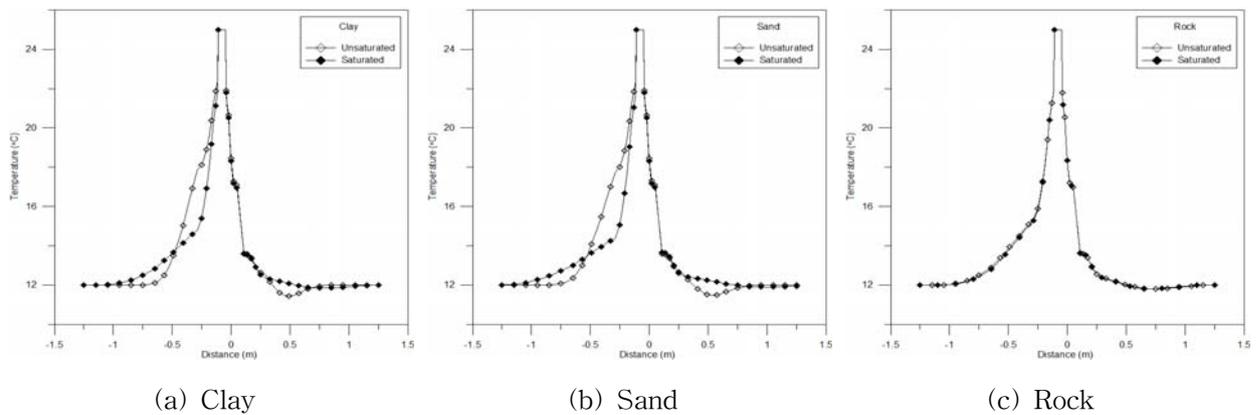


그림 3.5 PHC 말뚝에서의 각 지반조건에서 지하수가 열전달에 미치는 영향

에너지 파일이 시공된 지반의 지하수의 영향을 고려하기 위하여 PHC 말뚝에서 Clay와 Sand, Rock의 지반 조건에 대해 지하수에 포화된 지반과 포화되지 않은 지반을 비교하여 그림 3.5의 그래프로 나타내었다.

지하수에 의해 포화된 지반의 경우 포화되지 않은 지반에 비해 열을 더 잘 분산 시킬 수 있었으며, 열원 주변의 기울기가 크게 차이나는 것으로 보아 지하수에 의한 포화 여부가 열 전달에 있어 중요한 요소임을 알 수 있었다. 하지만 Rock 지반의 경우 지하수 유무에 따른 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 Rock지반 자체의 열전도도가 높아 지하수의 유무가 큰 차이를 보이지 않았다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지반조건을 고려한 에너지 파일의 열전달 거동을 알아보기 위해 ABAQUS를 사용하여 2차원 유한 요소 해석을 실시하였다. 해석은 토사의 종류, 지하수에 의한 포화여부, 뒷채움재에 따라 Case를 나누어 각 요소들의 영향 정도를 파악하였다. 수치 해석 결과를 통해 지반 조건에 따른 각각의 영향 정도를 파악하였으며 요소별 기본 조건을 통제하여 원하는 조건에서의 결과를 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. ABAQUS를 통한 2차원 유한 요소 해석을 통해 에너지 파일의 중심을 지나는 직선상의 지점들의 온도변화를 에너지 파일의 사용 말뚝의 차이에 따라 열전달 거동을 비교하였다. 열원으로 부터의 열을 얼마나 빨리 소산시키느냐는 그래프의 기울기를 통해 파악할 수 있는데, 동관, 강관, PHC 말뚝 순으로 그래프의 기울기가 큰 값을 가짐을 확인 하였다.

2. 에너지 파일에 사용된 말뚝의 종류에 따른 열전달 거동을 알아보기 위해 지반의 조건과 뒷채움재의 조건을 같게 하여 해석 하였으며, 여름철과 겨울철의 냉·난방 과정에 따른 열전달 거동을 파악하였다. 냉방과 난방 시의 열 확산 속도는 비슷하였으나 말뚝에 따른 영향과 지반 조건에 따라 조금씩 차이를 보였다. 동관의 경우와 Rock 지반의 경우 가장 열전달이 잘 나타났다.

3. 에너지 파일이 시공된 지반 조건에 따른 영향 효과를 파악하기 위하여 여러 지반 조건을 가정하여 해석을 실시하였다. Clay, Sand, Rock의 지반조건과 지하수에 의한 포화여부를 고려하였는데, Rock에서 가장 온도변화가 크게 나타나 열전도가 잘되었으며, 지하수에 의해 포화된 지반이 포화되지 않은 지반에 비해 열전달 효과가 크게 나타났다.

4. ABAQUS를 통한 2차원 유한 요소 해석을 통해 열교환 파이프와 가장 가까이 위치한 그라우트재에 따른 열전달 영향이 가장 크게 나타났다. 열전달 효율을 비교해본 결과 시멘트가 벤토나이트 그라우트에 비해 1.4~1.5배 더 큰 열전달 효율이 있음을 알 수 있었다.

5. 에너지 파일의 그라우트에 의한 영향 파악하기 위해 수치해석을 실시한 결과, 상대적으로 열전도도와 비열이 높은 시멘트 그라우트가 벤토나이트 그라우트에 비해 열전달이 효율적임을 확인했다. 그라우트는 열교환기와 말뚝, 그리고 외부 지반에 직접 열을 전달시켜 주고 열교환 능력에 직접적인 영향을 미치기 때문에 그 성능 개선 및 연구가 필요하다.

## 참고문헌

1. 강신영(2009), "지열 냉난방·발전 시스템의 개요 및 현황", *대한설비공학회*, Vol. 38, No. 1, pp. 6~12.
2. 강신영, 최중민, 손병후(2009), "지열원 열펌프 시스템의 종류 및 설치사례", *대한설비공학회*, Vol. 38, No. 1, pp. 18~27.
3. 김옥중, 고득용, 신우철, 백남준 (2005), "지열 이용 열펌프 시스템의 열성능 해석", *대한설비공학회*, 2005동계학술발표대회 논문집 pp. 167~172
4. 김후정(2009), "지열 냉난방 시스템에서 지중 열교환기의 열전달 거동 연구", *석사학위 논문*, 고려대학교
5. 박용부, 박종배, 임해식 (2007), "지열 냉난방 시스템에서 에너지 파일을 이용한 지중 열교환기 시공법", *대한토목학회지*, *대한토목학회*, Vol. 55, No. 7, pp. 41-46.
6. 백성권, 안형준(2004), "말뚝형 지열교환기의 열전달 성능평가에 관한 연구", *대한설비공학회*, 하계학술발표대회 논문집 pp. 1329~1333.
7. 백성권(2004), "중공말뚝을 이용한 지열 냉난방 시스템 개발에 관한 연구", *공학박사 학위 논문*, 부산대학교.
8. 손병후(2009), "단독주택용 지열 냉난방시스템의 개발 필요성", *대한설비공학회*, Vol. 38, No. 1, pp. 28~34.
9. 최항석(2008), "신재생에너지 개발 현황과 전망", *현대건설 기술지*, Vol. 3, pp. 11~18.
10. Austin, Warren A. III(1998), *Development of an In-Situ System for Measuring Ground Thermal Properties*, Masters Thesis, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.
11. Engineeringtoolbox.com, 2005
12. IGSHPA and Oklahoma State University (2000), *Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems: Design and Installation Standards*, Oklahoma State University, Stillwater Oklahoma.