

## 지중 열교환기의 순환수에 의한 열응력 및 열전달 거동 분석

### Analysis of thermal stress and heat transfer due to circulating fluid in ground heat exchanger

길후정<sup>1)</sup>, Hujeong Gil, 이강자<sup>1)</sup>, Kangja Lee, 이철호<sup>2)</sup>, Chulho Lee, 최항석<sup>3)</sup>, Hangseok Choi, 최효범<sup>4)</sup>, Hyobum Choi

<sup>1)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environment and Architectural. Engineering, Korea University

<sup>2)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Environment and Architectural. Engineering, Korea University

<sup>3)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environment and Architectural. Engineering, Korea University

<sup>4)</sup> (주)건화 기술연구소 상무, KUNHWA Co., LTD. Corporation

**SYNOPSIS** : In this study, a series of numerical analysis has been accomplished on the thermal performance and sectional efficiency of a closed-loop vertical ground heat exchanger (U-loop) in a geothermal heat pump system (GHP) considering the circulating fluid, pipe, grout and soil formation. A finite element analysis program, ABAQUS, was employed to evaluate the temperature distribution on the cross section of the U-loop system involving HDPE pipe/grout/formation and to compare sectional efficiency between the conventional U-loop and a new latticed HDPE pipe system. Especially, the latticed pipe is equipped with a thermal insulation zone in order to reduce thermal interference between the inflow pipe and the outflow pipe. Also, a thermal stress analysis was performed with the aid of ABAQUS. 3-D finite volume analysis program, FLUENT, was adapted to analyze a coupled system between fluid circulation in the pipe and heat transfer and simulate an operating process of the closed-loop vertical ground heat exchanger. In this analysis, the effect of the thermal properties of grout, rate of circulation pump, distance between the inflow pipe and the outflow pipe, and the effectiveness of the latticed HDPE pipe system are taken into account.

**Keywords** : Thermal Interference, U-loop, Latticed HDPE pipe, Heat strength

## 1. 서론

1992년 리우데자네이루에서 체결된 '기후 변화에 관한 국제 연합 기본 협약'에 이어, 1997년에 채택되어 2005년 2월 16일부로 발효된 '교토의정서'에 따르면 2008년부터 2012년까지의 기간 중에 선진국 전체의 온실 가스 배출량을 1990년 수준보다 적어도 5.2% 이하로 감축할 것을 목표로 하고 있다. 화석에너지를 대체할 신·재생에너지 개발이 요구되는 국제 정세에 맞추어 정부도 신·재생에너지의 개발 및 보급에 관심을 가지고 이에 대한 연구를 장려하고 있다. 지열에너지는 재생에너지로서 비교갈성이며 환경친화적인 에너지원이다. 지열에너지를 이용하는 대표적인 예가 지중 열교환기를 이용한 지열 냉난방 시스템이며 현재 우리나라도 지열 냉난방 시스템의 시장 규모가 점점 증가하는 추세이다. 현재 지열을 이용한 냉난방 시스템은 지하 약 200m까지의 비교적 심도가 얇은 천부 지열자원을 주로 이용

하고 있다. 지중열원(연중  $15 \pm 5^\circ\text{C}$ )을 이용하는 지열 냉난방 시스템은 개념적으로 겨울에는 상대적으로 따뜻한 지중열을 흡수하여 난방하며, 여름에는 차가운 지중으로 실내의 더운 열을 버리는 원리를 이용하여 냉방하게 된다. 지중 열교환기는 설치 방식에 따라서 수직형, 수평형, 지표수형, 지하수형으로 구분할 수 있으며 국내의 경우 설치 부지 문제로 수직 밀폐형 지중 열교환기를 주로 사용하고 있다. 본 논문에서는 수직 밀폐형 지중 열교환기의 열전달 거동 예측 및 단면의 형상에 따른 효율 분석을 위해 지중열 교환기와 뒷채움재 그리고 지반간의 열의 이동을 수치해석으로 모사하였다. 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 2차원 정상상태 열전달 해석 및 열응력 해석을 수행하고, 지중열 교환기 파이프 내로 유체의 흐름이 존재하는 경우의 열전달 거동 해석을 위해 열전달과 유체의 흐름 간의 연계 모델 해석이 가능한 유한체적해석(FVM) 프로그램인 FLUENT를 이용하여 유입 파이프와 유출 파이프 사이의 이격거리 및 뒷채움재의 종류, 파이프 사이의 단열을 위해 새로 고안된 격자형 파이프 모델에 대한 3차원 수치해석을 실시하였다.

## 2. 수치해석 조건 및 방법

### 2.1 2차원 유한요소 해석

#### 2.1.1 2차원 열전달 해석

유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 지중 열교환기 단면의 열전달 거동 및 열응력 분포를 알아보기 위한 2차원 유한 요소 해석을 수행하였다. 해석에는 지중에 설치된 지중 열교환기를 단순 모식화하여 사용하였다. 지중에 매설된 두께 5mm, 직경 3cm의 HDPE 파이프와 직경 15cm의 보어홀, 그리고 가로 1m, 세로 1m로 지반을 구성하였고, 보어홀 내 파이프를 제외한 부분을 구성하는 뒷채움재로는 시멘트를 가정하였다.

ABAQUS를 이용한 열전달 해석은 구성된 모델에 대해 냉방 과정(여름)과 난방 과정(겨울)을 가정하여 각각 유입 파이프에 고정된 온도를 경계조건으로 주어 기존의 일반형 파이프와 새로 고안한 격자형 파이프 단면에 대해 정상상태 흐름 해석을 수행하였다. 유입구와 유출구의 간격을 그림 1 (a)와 같이 s/D비로 나타내어 표 1의 다섯 가지 경우에 대한 해석을 실시하였다. s는 유입파이프와 유출파이프의 외경간 최단거리를 의미하고, D는 보어홀의 직경을 의미한다. 해석에 사용된 파이프 및 뒷채움재, 지반의 물성치는 표 2와 같다. 냉방 과정 해석의 경우 유입 온도를  $25^\circ\text{C}$ , 난방 과정 해석의 경우  $2^\circ\text{C}$ 의 경계조건을 각각 주었으며, 지반의 초기온도는  $12^\circ\text{C}$ 를 적용하였다.

표 1. 해석 단면 조건

case	D(mm)	s(mm)	s/D
1	150	4.5	0.03
2	150	15	0.10
3	150	27	0.18
4	150	37.5	0.25
5	150	49.5	0.33

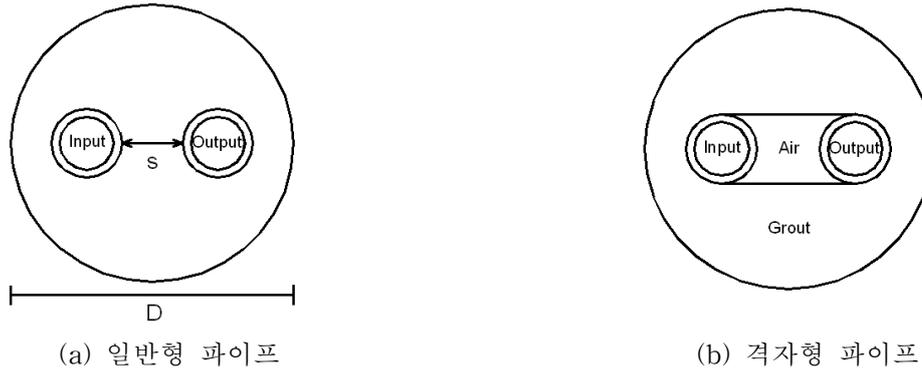


그림 1. 지중열 교환기 해석 단면 형상

표 2. 해석에 적용된 물성치

물성치	지반	뒷채움재	파이프
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	1820	3640	955
열용량(J/kg·K)	440	840	525
열전도도(W/m·K)	2.5	2.02	0.4

지중 열교환기의 뒷채움재는 낮은 투수계수를 통해 보어홀 주변의 지하수나 지표면의 오염물질이 보어홀 내로 유입되는 것을 방지한다. 또한, 지반으로 오염물질 유출을 방지하고, 지하수의 유입을 막는 것 이외에도 지중 열교환기 파이프를 순환하는 유동액과 보어홀 주변 토양층이나 암반층간의 열전달을 촉진하는 중요한 역할을 가지고 있다. 뒷채움재의 열전도도는 유동액과 지반 사이의 열전달에 있어 매우 중요한 인자가 되므로 뒷채움재의 열물성 특성에 대한 지중열 교환기 단면의 열전달 거동 파악을 위해 표 3과 같은 다섯 가지 조건에 따른 해석을 실시하였다.

표 3. 해석에 사용한 뒷채움재의 물성치

물성치	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	1580	2095	2610	3125	3640
열용량(J/kg·K)	380	495	610	725	840
열전도도(W/m·K)	0.9	1.25	1.5	1.75	2.02

case 1은 벤토나이트 뒷채움재, case 5는 시멘트 뒷채움재를 사용하였으며 다양한 해석 조건을 위해 case 1과 case 5의 값을 산술적으로 계산하여 case 2, case 3, case 4의 조건을 해석에 사용하였다. 해석에는 유입 파이프와 유출 파이프 사이의 이격거리로 0.18을 사용하였고, 지반의 온도는 12℃를 사용하였다. 유동액의 온도를 모사하는 경계 조건으로는 두 파이프 사이의 열간섭 현상 파악을 위해 유출 파이프의 온도는 고려하지 않고, 유입 파이프 내면의 경계 온도를 냉방 과정시 25℃, 난방 과정시 2℃를 적용하였다.

### 2.1.2 지중 열교환기 단면의 열응력 해석

계절에 따라 주기적으로 변하는 온도 cycle로 말미암아 HDPE 파이프의 팽창 및 수축으로 인한 변형, 뒷채움재의 수축 및 팽창, 크랙 등의 문제는 지중 열교환기의 효율을 저감시킬 수 있다. 따라서, 냉방 과정 및 난방 과정의 2차원 열전달 해석 결과를 이용하여 온도 분포에 의해 발생하는 지중 열교환기 단면의 열응력 해석을 수행하였다. 열응력 해석에는 앞 절에서 수행한 이격거리에 따른 다섯 가지 형상을

사용하였으며, 열응력 해석에 적용한 지반, 뒷채움재 및 파이프의 물성치는 표 4에 나타내었다. 탄성계수( $E$ ), 포아송 비( $\nu$ ), 열팽창 계수( $\alpha$ )는 BNL(Brookhaven national laboratory)의 Allan 과 Philioacopoulos(2000)이 제시한 물성치를 사용하였다. 지반의 온도는 12°C를 적용하였으며, 냉방 과정시 유동액의 유입 온도는 25°C, 난방 과정시 2°C 각각 적용하였다.

표 4. 열응력 해석에 사용된 물성치

물성치	지반	뒷채움재	파이프
밀도( $\text{kg/m}^3$ )	1820	3640	955
열용량( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )	440	840	525
열전도도( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )	2.5	2.02	0.4
탄성계수, $E$ (GPa)	2.0~5.5	13.8	1.4
포아송 비, $\nu$	0.33	0.21	0.45
열확산계수, $\alpha$ ( $\text{m/m}\cdot\text{K}$ )	$1.65 \times 10^{-5}$	$1.65 \times 10^{-5}$	$2.16 \times 10^{-4}$

## 2.2 순환수의 흐름을 고려한 3차원 열전달 해석

지중 열교환기 파이프를 순환하는 유체의 흐름에 따른 열전달 거동 해석을 위해 열전달과 유체의 흐름 간의 연계 모델 해석이 가능한 유한체적해석(Finite Volume Method) 프로그램인 FLUENT를 이용하여 수직 밀폐형 지중열교환기의 유입 파이프와 유출 파이프 사이의 이격거리에 따른 영향, 뒷채움재의 종류에 따른 영향, 파이프 단면 형상에 따른 영향등에 대한 일련의 해석을 수행하였다. 전체 해석 모델은 지중 열교환기의 실제 설치 조건을 고려하여 가로 1m, 세로 1m, 높이 100m의 사각기둥 모양의 지반에 직경 3cm의 두가닥 HDPE 파이프와 직경 15cm의 보어홀과 보어홀 내의 뒷채움재를 모사 하였다. 그림 2는 해석에 사용된 해석 모델 형상을 보여 준다. 해석 모델은 파이프와 뒷채움재, 지반 등을 포함하여 약 170만개의 요소로 구성되었다.

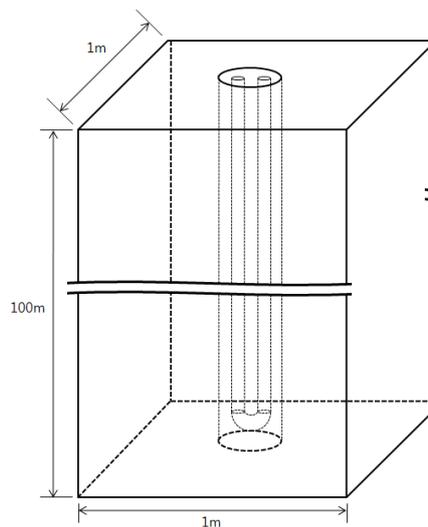


그림 2. 지중 열교환기 해석 모식도

지중 열교환기에서 기존 일반형 파이프의 유입구와 유출구 사이의 간격에 따른 지중 열교환기의 열전달 효율을 파악하기 위해 2차원 해석과 동일하게 s/D비로 나타내어 표 1의 다섯 가지 경우에 따라 냉방

과정(여름)과 난방 과정(겨울)에 대해 정상 상태 흐름을 해석하였다. 지중 열교환기 파이프를 순환하는 열유동액의 유입온도는 냉방 시 25℃, 난방 시 2℃를 적용하였고, 지반 깊이 5m이하의 지중 온도는 대기온도의 영향을 받지 않으며 연중 약 12~15℃를 유지하므로 지반의 온도는 12℃를 입력하였다. 뒷채움재로는 시멘트를 사용하였고, 보편적인 지반 조건을 가정하여 지반의 물성치를 입력하였다. 열유동액은 보통 염화칼슘, 에틸렌글리콜(Ethylene Glycol), 프로필렌글리콜(Propylene glycol) 등이 흔히 사용되며 본 해석에서는 유동액으로 에틸렌글리콜을 가정하였다. 특히, 열유동액의 유입 속도는 지중 열교환기의 일반적인 유입 속도인 0.6m/s를 사용하였다(한정상 등, 2005). 자세한 해석 조건은 표 5에 나타내었다.

표 5. 해석에 쓰인 물성치

물성치	지반	그라우트	유동액
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	1820	3640	998.2
열용량(j/kg · K)	440	840	4182
열전도도(w/m · K)	2.5	2.02	0.6
점성계수(kg/m · s)	-	-	0.001

뒷채움재의 열전도 특성에 따른 지중열 교환기의 열전달 효율을 분석하기 위해 뒷채움재의 차이에 대한 해석을 실시하였다. 해석에 적용된 뒷채움재의 물성치는 표 3과 같다. 특히, case 1, case 5는 벤토나이트 뒷채움재와 시멘트 뒷채움재를 고려한 것이다. 해석에 적용한 뒷채움재의 열전도도는 순수 벤토나이트 그라우트가 아닌 천연규사와 혼합한 상태의 뒷채움재를 고려하였다. 뒷채움재의 해석에는 유입 파이프와 유출 파이프간의 간격으로  $s/D=0.18$ 을 적용하였다. 순환 유동액의 유입 속도는 0.6m/s를 적용하였고, 지반의 온도는 12℃, 파이프에 유입되는 순환 유동액의 온도는 냉방 과정을 고려하여 25℃를 적용하였다.

유입파이프와 유출파이프 사이의 열간섭 현상이 지중열 교환기의 전체적인 열전달 효율에 미치는 영향을 평가하기 위해 그림 1 (b) 같은 새로 고안된 격자형 파이프 형상에 대한 해석을 하였다. 유입 파이프와 유출 파이프 사이에 단열효과를 위해 그라우트 대신 상대적으로 열전도도가 낮은 공기를 채워넣은 격자형 파이프를 모사하여 해석에 적용 하였다. 일반형 파이프와의 열전도 효율 비교를 위해 유입 파이프와 유출 파이프의 간격이  $s/D=0.18$ 인 형상에 대해 해석하였다. 격자 형태의 파이프 이외의 보어홀 직경과 해석 지반의 범위는 일반형 파이프 해석시와 동일하다. 해석 모델은 파이프와 뒷채움재, 지반, 격자등을 포함하여 585874개의 절점과 535267개의 요소로 구성 되었다. 해석에 쓰인 물성치로 그라우트와 지반 유동액은 표 3과 같고, 격자안의 공기에 대한 물성치를 추가하였다. 공기의 밀도는 1.225kg/m<sup>3</sup>, 열용량은 1006.43j/kg · K, 열전도도는 0.01w/m · K, 점성계수는  $1.79 \times 10^{-5}$ kg/m · s로 적용하였다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 2차원 열전달 및 열응력 해석

##### 3.1.1 이격거리에 따른 영향 분석

유입 파이프가 유출 파이프에 미치는 열간섭 현상을 정량적으로 파악하기 위해 해석결과를 그림 3과 같이 유출 파이프와 뒷채움재의 경계면의 평균 온도를 산정하여 나타내었다.

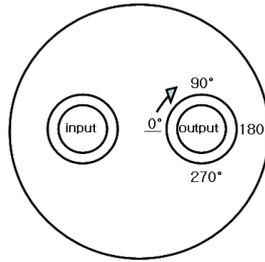


그림 3. 유출 파이프 경계면에서의 온도측정 방향

그림 4는 냉방과정 및 난방과정 시 이격거리에 따른 해석 결과를 일반형 파이프와 격자형 파이프의 유출파이프 경계면의 평균온도로 나타내었다.

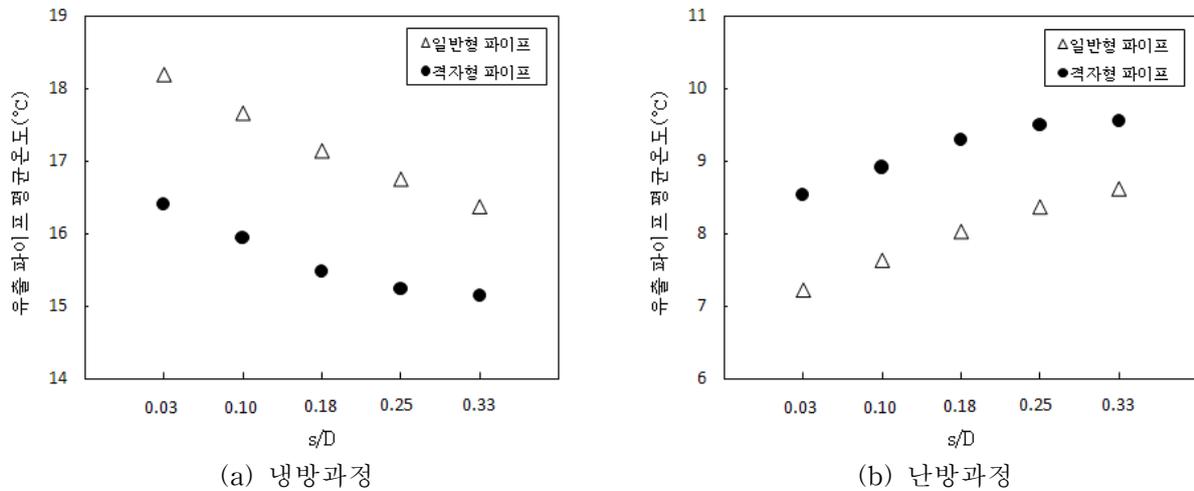


그림 4. 이격거리에 따른 일반형 파이프와 격자형 파이프의 해석결과

그림 4에서 볼 수 있듯이 일반형 파이프와 격자형 파이프 모두 이격거리가 증가함에 따라 유입파이프와 유출 파이프 사이의 열간섭이 줄어들어 냉방과정 시에는 유출파이프의 평균온도가 점점 낮아지고, 난방과정 시에는 온도가 점점 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 또한  $s/D$  가 0.03, 0.1, 0.18, 0.25, 0.33인 다섯 가지 경우 모두 일반형 파이프에 비해 격자형 파이프의 열전달 효율이 뛰어난 것을 파악할 수 있다. 이는 격자형 파이프의 단열 구간에 채워진 공기의 낮은 열전도도에서 기인한다. 공기는 열전도도는 약  $0.01W/m\cdot K$  으로 일반적인 시멘트의 열전도도  $2.02W/m\cdot K$  보다 상대적으로 낮은 열전도도를 갖는다. 따라서 유입 파이프와 유출 파이프의 열간섭은 현저히 줄어들게 된다. 이와 같은 경향은 난방 과정의 일반형 파이프와 격자형 파이프의 결과에서도 동일하게 확인할 수 있다.

### 3.1.2 뒤틀림 종류에 따른 영향 분석

뒤틀림 종류에 따른 해석 결과를 그림 5에 나타내었다. 해석 결과를 살펴보면 냉방과정 시 열전도도가  $0.9W/m\cdot K$  인 case 1의 경우 유출 파이프 경계면 평균온도  $16.58^{\circ}C$ , 열전도도가  $2.02W/m\cdot K$  인 case 5의 경우  $17.14^{\circ}C$ 로 더 높은 온도를 보였다. 또한 난방과정 시에는 유입 온도  $2^{\circ}C$ 에 대하여 case 1의 경우 유출 파이프 경계면 평균온도  $8.46^{\circ}C$ , case 5의 경우  $8.04^{\circ}C$ 로 열전도도가 증가함에 따라 온도가 유출 파이프 측의 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 이를 통해 뒤틀림재의 열전도도가 증가함에 따라 유입 파이프와 유출 파이프 사이의 열간섭 현상이 증가하여 지중 열교환기 효율을 저감시킴을 확인할 수 있다.

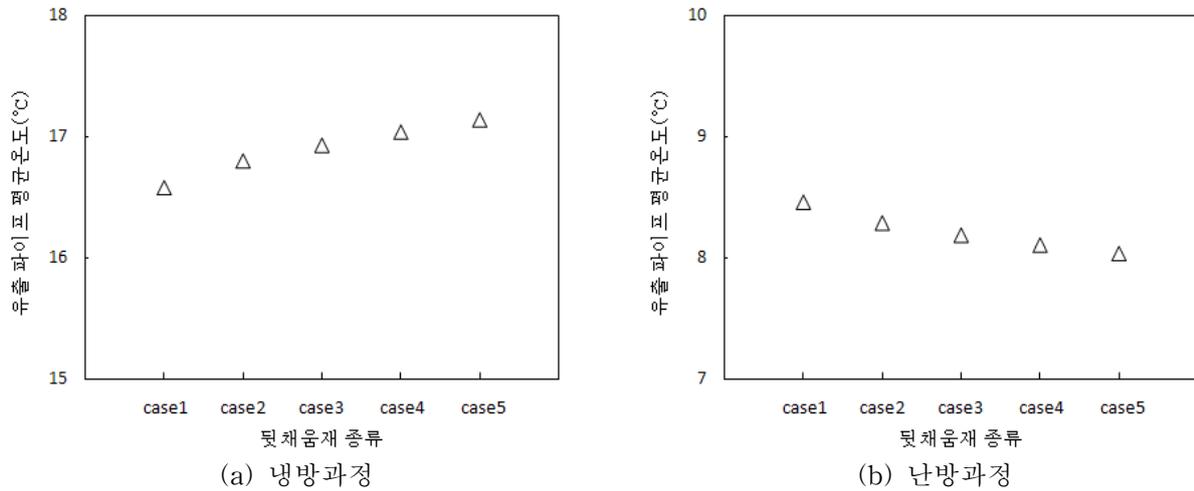


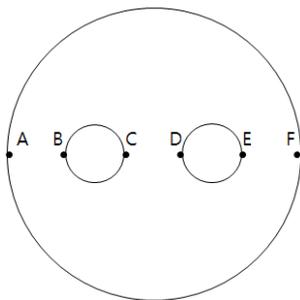
그림 5. 뒷채움재의 종류에 따른 해석결과

### 3.1.3 2차원 열응력 해석결과

지중 열교환기 단면의 2차원 열응력 해석 결과를 von mise stress를 이용하여 나타내었다. von mises stress,  $\sigma_v$ 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1)$$

지중 열교환기 단면의 2차원 열응력 해석 결과 냉방과정과 난방과정 모두 높은 온도를 갖는 지점에서 큰 응력이 발생함을 확인하였다. 열교환 파이프에서 뒷채움재와 지반으로의 열전달이 이루어지는 과정에서 위치에 따라 온도 구배가 생기고, 이는 열응력을 발생시킴을 파악하였다. 온도에 따른 열응력 분포를 정량적으로 파악하기 위해 해석결과에 대해 그림 6과 같이 6개의 점에 대하여 온도와 열응력을 표 6에 나타내었다. 표 6은 냉·난방 과정에 대한 열전달 및 열응력 해석 결과를 보여준다.



- A : 보어홀 왼쪽 경계면
- B : 유입 파이프 왼쪽 경계면
- C : 유입 파이프 오른쪽 경계면
- D : 유출 파이프 왼쪽 경계면
- E : 유출 파이프 오른쪽 경계면
- F : 보어홀 오른쪽 경계면

그림 6. 온도와 열응력의 측정 위치

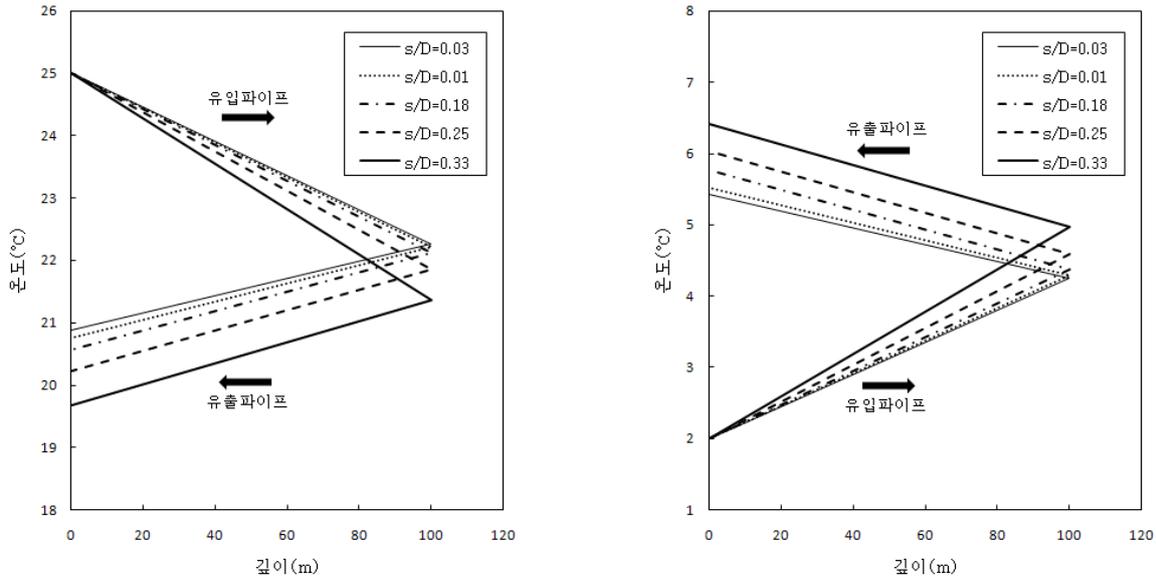
표 6. 위치에 따른 온도와 열응력(s/D=0.18)

구분	냉방		난방	
	온도(°C)	열응력(Kpa)	온도(°C)	열응력(Kpa)
A	18.368	5362.64	7.101	1994.19
B	20.631	5709.85	5.360	1727.11
C	20.967	5920.39	5.101	1565.15
D	19.006	5436.15	6.610	1937.65
E	15.761	4556.52	9.106	2614.28
F	15.475	4655.57	9.326	2538.09

### 3.2 3차원 열전달 해석 결과

#### 3.2.1 이격거리에 따른 영향

이격거리에 따른 해석을 통해 일반형 파이프의 경우 유입 파이프로부터 유출파이프로의 열간섭 영향을 파악하였다. 순환 파이프 내 유체 흐름에 대한 해석이 가능한 3차원 해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 실시한 이격거리에 따른 해석 결과, 이격거리가 증가함에 따라 유입 파이프와 유출 파이프 사이의 열간섭이 감소함을 확인하였다. 냉방 과정 및 난방 과정 해석 결과를 유입파이프와 유출 파이프의 길이별 온도분포로 그림 7에 나타내었다.



(a) 냉방과정

(b) 난방과정

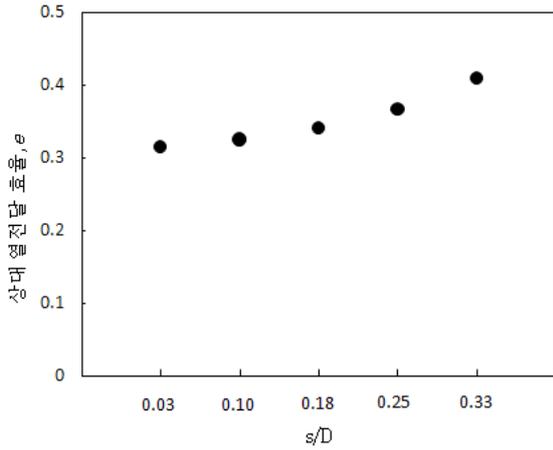
그림 7. 이격거리에 따른 해석 결과

또한 열전달 효율의 차이를 정량적으로 파악하기 위해 상대열전달 효율,  $e$ 를 식 (2)와 같이 나타내어 그림 8에 표현하였다.

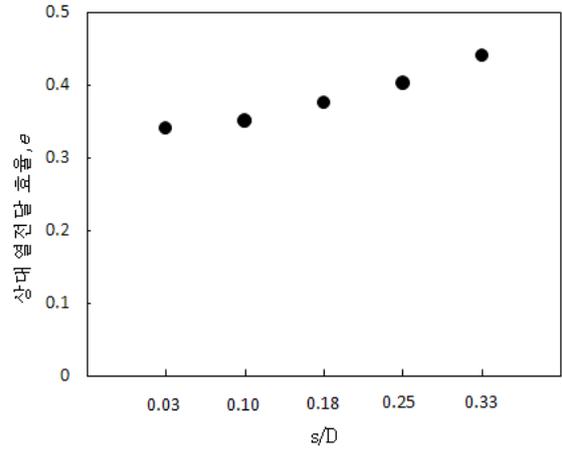
$$e = \left| \frac{\Delta T}{\Delta T_0} \right| \quad (2)$$

여기서  $\Delta T_0$ 는 유동액의 유입온도와 초기 지반온도의 차이,  $\Delta T$ 는 유동액의 유입온도와 해석 결과 유출 온도의 차이를 나타낸다. 따라서  $e$ 가 1에 가까울수록 지중 열교환기내의 유동액의 열이 뒷채움재와 지반으로 전달이 잘 이루어진 경우이며,  $e$ 가 0에 가까울수록 열전달 효율이 적은 것으로 평가할 수 있다.

해석 결과를 살펴보면 이격거리가 증가함에 따라 유입 파이프와 유출 파이프 사이의 열간섭이 줄어들어 열전달 효율이 증대됨을 확인 할 수 있다. 그림 8 (a)는 이격거리에 따른 냉방과정 해석 결과를 나타내준다. 이격거리가 증가함에 따라 유동액의 유출 온도가 점점 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 난방 과정의 해석 결과에서는 이격거리가 증가함에 따라 열전달이 더 원활히 이루어져 유동액의 유출온도가 더 높아지는 것을 그림 8 (b)에서 확인 할 수 있다.



(a) 냉방과정

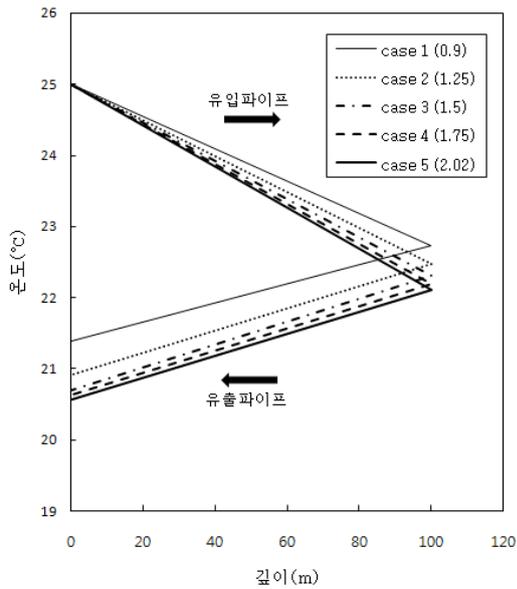


(b) 난방과정

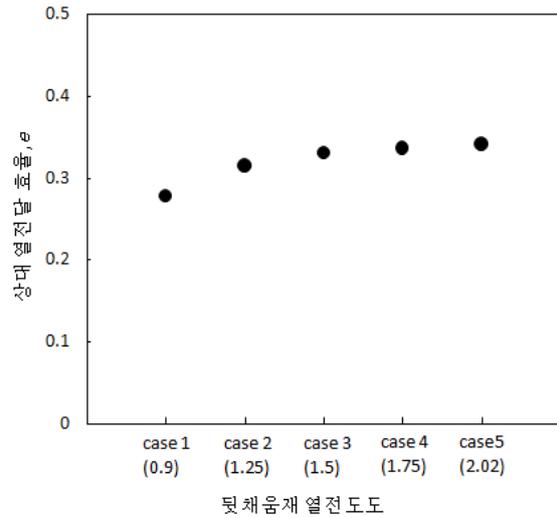
그림 8. 상대 열전도율

### 3.2.2 뒷채움재의 종류에 따른 영향

이격거리  $s/D$  비가 0.18인 경우에 대해 뒷채움재의 종류에 따른 열전달 해석을 실시한 결과 상대적으로



(a) 깊이에 따른 온도 분포



(b) 상대 열전달 효율

그림 9. 뒷채움재의 종류에 따른 해석 결과

로 열전도도가 높은 뒷채움재의 경우 열전달이 원활히 이루어짐을 확인하였다. 그림 9는 뒷채움재의 종류에 따른 해석결과를 보여준다. 그림 9 (a)를 살펴보면 case 1에서 case 5로 갈수록 열전도도가 높아짐에 따라 열전달이 원활히 이루어져 더 낮은 유출 온도를 갖음을 확인할 수 있다. 그러나 case 1에서 case 5로 갈수록 유출온도의 차이가 현저히 줄어드는 경향을 보이는데, 이러한 현상은 뒷채움재의 열전도도의 증가는 유동액으로부터 뒷채움재와 지반으로 열전달을 원활하게 할 수는 있으나, 뒷채움재의 열전도도가 높아짐에 따라 오히려 유입파이프와 유출파이프 사이의 열간섭을 증가시켜 열전달 효율을 반감시키는 것으로 설명될 수 있다. 따라서 단순히 뒷채움재의 열전도도를 증가시키는 것 보다는 열간섭을 최소화 하고 열전달을 최대화 시킬 수 있는 적절한 배합비의 산정이 중요하다. 그림 9 (b)는 뒷채움재의 종류에 따른 해석결과를 상대 열전달 효율로 나타내었다. 뒷채움재의 열전도도가 증가함에 따라

순환 파이프로부터 지반과 뒷채움재료의 열전달이 원활히 이루어져 열전달 효율이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2.3 지중 열교환기 단면 형상에 따른 영향

파이프간 열간섭을 줄일 수 있도록 개발된 격자형 파이프에 대한 FLUENT 해석을 실시한 결과, 격자형 파이프의 경우 일반형 파이프보다 열간섭이 작아짐을 확인하였다. 그림 10에는 해석결과를 일반형 파이프와 격자형 파이프의 깊이에 따른 온도 분포로 함께 나타내었다. 해석결과 격자형 파이프의 경우 상대 열전달 효율,  $e$  값이 0.360 으로, 0.341의 값을 갖는 일반형 파이프보다 열전달이 잘 이루어짐을 정량적으로 파악할 수 있다.

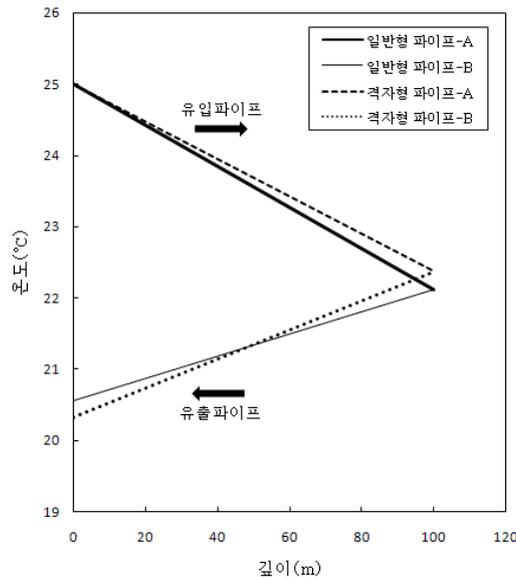


그림 10. 일반형 파이프와 격자형 파이프의 비교

일반형 파이프와 격자형 파이프의 유입 파이프의 깊이에 따른 온도 분포를 살펴보면 일반형 파이프의 경우 기울기가 더 큼을 확인할 수 있는데, 이는 열을 방출할 수 있는 유입 파이프 주변 뒷채움재의 단면적이 격자형 파이프에 비해 일반형 파이프가 더 넓기 때문이다. 격자형 파이프의 격자 부분은 유입 파이프와 유출 파이프 사이에 뒷채움재에 비해 상대적으로 낮은 열전도도를 갖는 공기로 채워져 있어 유입 파이프를 순환하면서 열을 방출할 면적이 상대적으로 좁아진다. 따라서 유동액이 유입 파이프를 순환하는 경우에는 일반형 파이프의 열전달 능력이 더 뛰어난 것을 알 수 있다. 그러나 유출 파이프의 깊이에 따른 열전달 거동은 유입 파이프 측과 상반된 결과를 보여준다. 격자형 파이프의 온도 감소율이 일반형 파이프에 비해 더 큼을 확인할 수 있는데 이러한 경향은 일반형 파이프의 경우 유입 파이프와 유출 파이프 사이의 열간섭이 원인이 된다. 일반형 파이프는 유동액이 유입 파이프를 흐르면서 열을 뒷채움재와 지반을 통해 방출하지만 파이프 끝을 돌아 나오면서 유출 파이프 측을 흐를 때에는 상대적으로 온도가 더 높은 유입 파이프로부터 열간섭을 받음으로써 뒷채움재와 지반으로 열을 방출함과 동시에 두 파이프 사이의 뒷채움재에서 열을 흡수하게 된다. 반면, 격자형 파이프의 경우에는 파이프 끝을 지난 유동액이 두 파이프 사이의 단열물질인 공기로 인해 유입 파이프 측에서의 열간섭을 거의 받지 않으므로 반대편의 뒷채움재와 지반으로의 열 방출이 용이하게 된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 지중 열교환기의 HDPE 파이프의 열전달 거동 예측 및 단면의 형상에 따른 효율 분석을 위해 수치해석 프로그램인 ABAQUS와 FLUENT를 이용하여 지중열 교환기의 열전달 거동을 해석하였다. ABAQUS를 이용하여 해석한 이격거리에 따른 냉난방시의 열간섭 효과를 확인하였다. 또한 격자형 파이프의 해석을 통해 기존 파이프와의 비교를 수행하였다. 기존 HDPE 파이프의 경우 이격거리가 작을수록 유입 파이프와 유출파이프 간의 높은 열간섭 현상을 보였다. 격자형 파이프는 유입 파이프와 유출 파이프 사이에 그라우트보다 상대적으로 작은 열전도도를 갖는 공기를 채움으로써 유입 파이프와 유출 파이프의 열간섭 효과가 일반형 파이프의 경우보다 적음을 확인하였다. 또한, 2차원 열응력 해석을 통해 파이프와 뒷채움재 및 지반 사이의 온도구배로 인한 열응력이 발생함을 확인하였다. 열응력으로 인해 파이프와 뒷채움재 사이의 빈공간이 발생할 수 있으므로 실제 시스템 가동 시, 열응력에 대한 고려가 필요하다. 파이프 단면의 형상에 따른 열간섭 현상의 차이는 FLUENT를 이용한 3차원 해석에서도 확인되었다. FLUENT를 이용한 그라우트재에 따른 열전달 해석에서는 상대적으로 열전도도가 높은 뒷채움재의 경우 열전달이 더 원활히 이루어져 높은 열전달 효율을 가짐을 확인하였다. 유입 파이프와 유출 파이프 사이의 열간섭은 지중열 교환기의 효율에 많은 영향을 미치므로 이격거리나 격자형 파이프와 같은 효율적인 단면의 형상 등 기존 HDPE파이프의 개선이 필요함을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(06건설핵심D04)와 지식경제부 신재생 에너지 센터 신재생에너지 기술개발 사업(2008-N-GE08-R-01) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 최항석, 이철호, 길후정, 최효범, 이상백 (2007) “수직 밀폐형 지중 열교환기용 뒤채움재의 열전도 및 점토특성 연구”, 한국신재생에너지학회논문집, 제3권, 12월, 4호, pp. 38-46.
2. 최항석, 이철호, 최효범, 이상백 (2008) “지중 열교환기용 뒤채움재의 물리적 특성연구” 한국지반공학회논문집, 제24권, 1호, pp. 37-49
3. A.J Philippacopoulos and M.L Berndt(2001). Influence of Debonding in Ground Heat Exchangers Used with Geothermal Heat Pumps. Geothermics. Vol 30. pp527-545
4. ASHRAE(2000). Geothermal Energy. ASHRAE Handbook-Applications. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
5. Cane, R.L. and Forgas D.A.(1991). Modeling of ground source heat pump performance. ASHRAE Trans, Vol.97 pp.909-925
6. FLUENT (2008), Fluent Manual ver. 6.3, Fluent Inc.
7. M.L. Allan and A.J. Philippacopoulos(1999). Properties and Performance of Cement-Based Grouts for Geothermal Heat Pump Application. Final Report FY 1999. Brookhaven National Laboratory.