

## 수직형 지중 열교환기의 현장 열응답 시험과 CFD 해석 비교

심용섭<sup>1</sup>, 이희상<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>인천대학교 기계시스템공학과

### The Comparison of the In-Situ Thermal Response Tests and CFD Analysis of Vertical-type Geothermal Heat Exchanger

Yong-Sub Sim<sup>1</sup> and Hee-Sang Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, University of Incheon

**요약** 본 연구에서는 수직형 지중 열교환기의 3차원 CFD 해석 기법을 제안하여 2개소의 현장 열응답 시험과 비교하였다. CFD 해석 비교를 위해 GAMBIT을 이용하여 지중과 지중 열교환기 형상을 모델링하였으며, 상용코드인 FLUENT를 사용하여 3차원 열전달 유동 해석을 수행하였다. 2개소의 현장 열응답 시험에서 도출된 지중 유효 열전도도와 지중 초기온도를 경계조건으로 사용하였으며, 시간에 따른 지중 열교환기의 입구온도 변화는 profile을 사용하여 실제 조건을 모사하였다. CFD 해석 결과 2개소의 지중 열교환기 출구온도는 0.5℃ 범위 내에서 예측하였고, 기울기는 1.6% 이내에서 적절히 예측하였다. 향후 CFD 해석 기법을 활용하여 지중 열교환기 깊이, 형상 및 배열 변화 등에 따른 성능예측에 활용하고자 한다.

**Abstract** In this study, a series of CFD analysis was performed in order to predict the leaving water temperature and the slope of in-situ thermal response tests of the vertical-type geothermal heat exchangers. The geothermal heat exchanger and surrounding ground formation were modeled using GAMBIT and simulation was used by utilizing FLUENT which is commercial CFD code. Comparing with the results of CFD and in-situ thermal response tests, the results of CFD was presented good agreement with 0.5℃ difference of Leaving Water Temperature and with 1.6% difference of the Slope.

**Key Words** : CFD(Computational Fluid Dynamics), Ground Heat Pump System, In-Situ Thermal Response Test, Vertical-type Geothermal Heat Exchanger

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 목적

최근 신재생에너지 이용에 대한 관심의 증가로 관련 기술개발과 보급 사업이 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 지열에너지를 활용한 지열원 히트펌프 시스템에 대한 연구와 설치 사례도 증가하고 있다.

지열원 히트펌프 시스템은 지중을 히트싱크(heat sink) 또는 열원(heat source)으로 이용하여 건물 냉·난방에 필요한 에너지를 공급하는 시스템으로, 지중의 토양을 이용

하는 밀폐형 시스템과 지하수를 이용하는 개방형 시스템으로 구분된다.

국내에서는 주로 수직형 지중 열교환기를 사용하는 밀폐형 시스템이 이용되고 있다. 수직형 지중 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀(borehole)에 지중과 열교환을 위한 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 재질의 U자형 열교환기를 삽입한 후, 열교환기와 보어홀 벽면 사이의 빈 공간을 그라우팅 재료(grouting material)를 채워 시공한다. 여기서 수직형 지중 열교환기는 전체 지열원 히트펌프 시스템의 성능과 초기 투자비를 결정하는 중요한 요소 중 하나이

본 논문은 2011년도 인천대학교 자체연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

\*Corresponding Author : Hee-Sang Lee(Incheon Univ.)

Tel: +82-32-835-8682 email: hslee@incheon.ac.kr

Received April 19, 2013

Revised (1st June 12, 2013, 2nd June 24, 2013)

Accepted July 11, 2013

다.

수직형 지중 열교환기를 최적 설계하기 위해 지중 유효 열전도도를 정확하게 산정한 후 설계에 적용하는데, 실무적으로 현장 열응답 시험(In-Situ Thermal Response Test)을 수행하고 시험결과를 선형 열원 모델(line-source model)로 해석하는 방법으로 연계 된다[1].

하지만 현장 열응답 시험은 보어홀 설치에 필요한 천공 비용과 보어홀 설치 후 주위와 열평형이 이루어진 시점(보통 1주일 이상)에서 48시간 이상 실시해야 하는 등 비용과 시간 투자가 수반되어야 한다.

CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 활용하여 지중 열교환기의 해석에 관한 연구로는 이용범 등이 수직형 지열교환기와 그 주위의 열거동을 해석하기 위해 제시한 1차원 열전달 모델의 타당성을 실험을 통해 검증하였다. 김성수는 2차원 CFD 해석 결과를 실측 데이터와 비교하여 거의 유사하게 예측함을 보였고, 이상우 등은 3차원 CFD 해석 방법을 제안하여 수직형 지중 열교환기 출구온도의 실측값을 예측하였다[2-4].

본 연구에서는 향후 CFD 해석 기법을 이용하여 지중 열교환기의 깊이, 형상, 배열 및 순환수 유량 변화 등에 따른 성능예측에 활용하기 위해 3차원 CFD 해석 기법을 제안하고, 직경과 깊이가 다른 2개소의 수직형 지중 열교환기 현장 열응답 시험 결과와 비교·평가하였다.

### 1.2 연구범위 및 방법

3차원 CFD 해석 기법의 정확성을 평가하기 위해 2개소의 현장 열응답 시험의 결과값(출구온도와 기울기)과 시뮬레이션 결과값을 비교하여 시뮬레이션을 평가하였다.

CFD 해석을 위한 모델링은 격자생성 프로그램인 GAMBIT 2.2.30을 이용하였고, 상용코드인 FLUENT 6.3.35를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. 본론

### 2.1 현장 개요

본 연구에서 제안한 CFD 해석 기법의 신뢰성을 확인하기 위한 2개소의 현장 개요는 다음과 같다.

첫 번째 현장(Case 1)은 충남에 위치하고, 지중 열교환기 매설 깊이는 150m, 관경은 32mm이다. 두 번째 현장(Case 2)은 강원도에 위치하고, 매설 깊이는 200m 관경은 40mm이다. 2개소 모두 HDPE 재질의 열교환기를 사용하였으며, Table 1과 같다.

[Table 1] Outline of sites

	Case 1	Case 2
Location	ChungNam	KangWon
Depth	150 m	200 m
Diameter	32 mm	40 mm
Material	HDPE U-tube	

### 2.2 현장 열응답 시험 결과

2개소의 현장 열응답 시험 결과를 Table 2에 나타내었다. 48시간 동안 시험 데이터를 취득하였고, 작동유체의 입·출구온도 평균값과 시간을 선형화한 방정식의 기울기는 Case 1이 1.8781, Case 2가 1.8151이었다. 지중 유효 열전도도의 값은 Kelvin의 선형 열원 모델을 적용하여 단순화된 선형 방정식을 사용하여 계산하였으며, Case 1은 2.53, Case 2는 2.41 [W/m·K]을 얻었다.

[Table 2] Results of In-Situ Thermal Response Tests

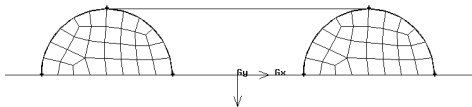
	Case 1	Case 2
Measured Time [hr]	48	
Initial Ground Temp. [°C]	14.5	16.0
Water Flow Rate [LPM]	24.3	35.1
Heat Transfer Rate [W]	8,947	11,016
Slope [-]	1.8781	1.8151
Ground Conductivity [W/m·K]	2.53	2.41

### 2.3 모델링 및 시뮬레이션

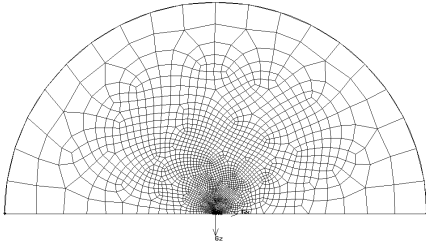
2개소의 실험 현장에 대한 모델링은 매설된 지중 열교환기와 지중을 반(half)으로 단순 형상화하여 대칭(symmetry) 조건을 사용하였다. 지중 열교환기의 주변 열환경을 분석하고 표현하기 위해 지중을 직경 10m, 깊이는 각각 155m(Case 1), 205m(Case 2)의 반(half) 원기둥 형태로 형상화하였고, 그 중심에 지중 열교환기를 모델링하였다.

Fig 1~3은 수직형 지중 열교환기와 지중의 형상을 모델링하고 격자를 생성한 그림이다.

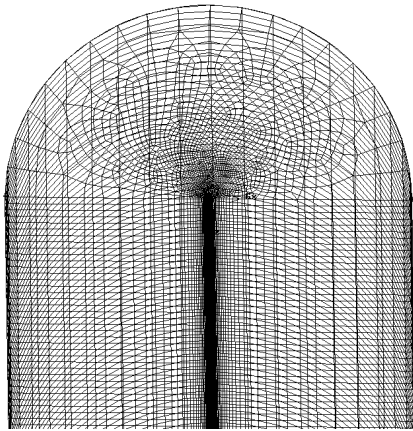
상용코드인 FLUENT를 사용하여 CFD 해석을 수행하였으며, 비정상 유동에 대한 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지방정식 그리고 k-epsilon 난류 모델을 이용하였다.



[Fig. 1] View of heat exchanger



[Fig. 2] View of heat exchanger and ground



[Fig. 3] 3D View of heat exchanger and ground

## 2.4 물성치 및 경계조건

### 2.4.1 물성치

2개소 현장 열응답 시험에서 지중 열교환기를 순환하는 작동유체는 물이 사용되었다. 지중의 밀도와 비열은 일반적 암석의 평균값을 물성치로 설정하였고, 지중의 열전도도는 Table 2에서와 같이 2개소의 현장 열응답 시험을 통해 얻은 지중 유효 열전도도를 사용하였으며, Table 3과 같다.

[Table 3] Properties

	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Specific heat [J/kg · K]	Conductivity [W/m · K]	Viscosity [kg/m · s]
Water	995.3	4183	0.6045	0.000781
Ground	2800	860	2.53 (Case 1) 2.41 (Case 2)	-

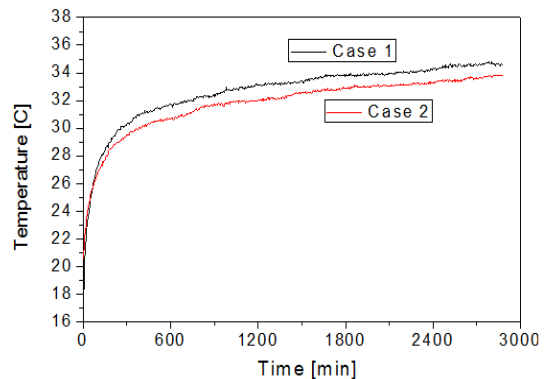
### 2.4.2 지중온도

현장 열응답 시험 전에 매설된 지중 열교환기에 물을 채워 물의 온도가 지중 온도와 동일해질 때 까지 약 30분 동안 무부하 상태로 물을 순환시키는 과정을 거치게 되는데, 이를 통해 지중 초기온도를 측정하게 된다. 이렇게 측정된 2개소의 지중 초기온도는 Table 2에서와 같이 Case 1이 14.5℃, Case 2가 16℃이며, CFD 해석을 위한 지중온도의 경계조건으로 설정하였다.

### 2.4.3 입구온도

시간에 따른 지중 열교환기 입구온도는 2개소의 현장 열응답 시험을 통해 측정된 입구온도를 profile로 작성하여 CFD 해석에 사용하였다.

Profile로 작성된 입구온도는 실제 측정된 입구온도와 0.1℃ 이내에서 일치하였다. 2개소의 설정된 profile을 그래프로 표현하여 Fig 4에 나타내었다.



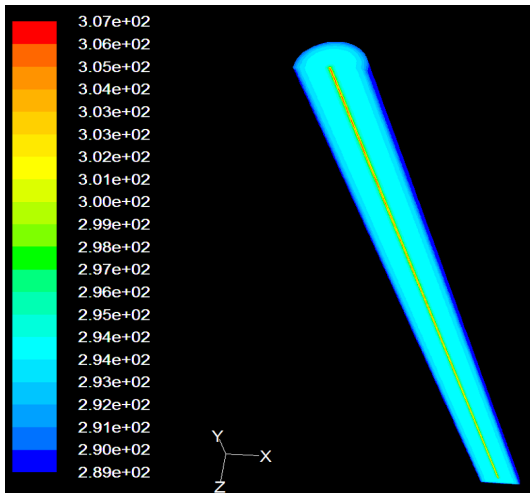
[Fig. 4] Graph of Entering Water Temp. Profiles

## 2.5 결과

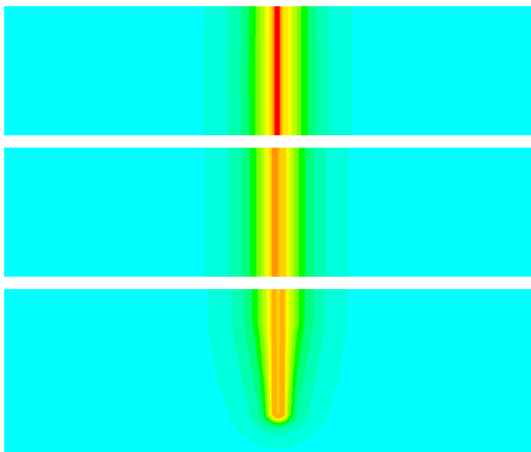
CFD 해석 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 2.4절의 물성치와 경계조건을 이용하여 CFD 해석을 수행하였다.

### 2.5.1 출구온도 비교

Fig 5에는 Case 1의 CFD 해석 결과를 온도분포로 표현하여 나타내었다. Fig 6은 CFD 해석 결과를 지중 열교환기의 입 · 출구면을 기준으로 깊이 방향으로 3구간으로 나누어 열교환기를 중심으로 온도분포를 부분적으로 표현하였다.



[Fig. 5] 3-D Temp. Contours from CFD result of Case 1

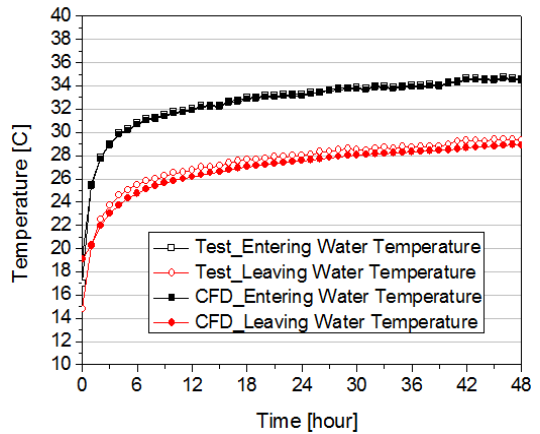


[Fig. 6] 2-D Temp. Contours from CFD result of Case 1

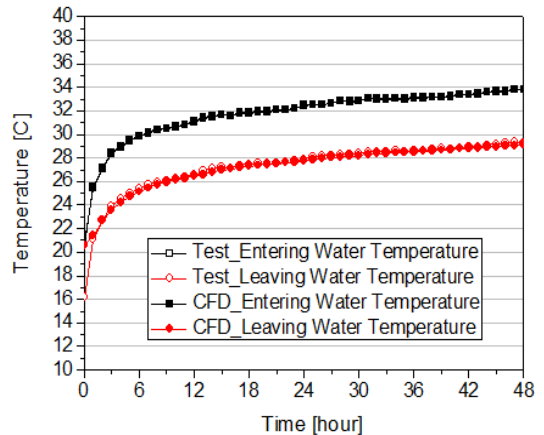
Fig 7와 8에는 Case 1과 Case 2의 CFD 해석 결과값과 현장 열응답 시험의 입·출구온도를 그래프로 각각 나타내었고, 2개소 CFD 해석 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 12시간 간격으로 CFD 결과값과 시험 실측값의 출구온도와 온도차를 Table 4에 나타내었다.

Case 1의 경우 12시간 후의 시험 실측값은 26.7℃, CFD 결과값은 26.2℃로 0.5℃의 온도차를 보였다. 그후 24시간부터 48시간까지는 실측값과 CFD 결과값의 온도차는 0.4℃로 일정하게 유지되었다.

Case 2의 경우 12시간 후의 시험 실측값은 26.6℃, CFD 결과값은 26.4℃로 0.2℃의 온도차를 보였고, 이후 48시간까지 0.2℃ 이내에서 온도차가 일정하게 유지함을 보였다.



[Fig. 7] Test data and CFD result of Case 1



[Fig. 8] Test data and CFD result of Case 2

[Table 4] Test data and CFD results of Leaving Water Temperature

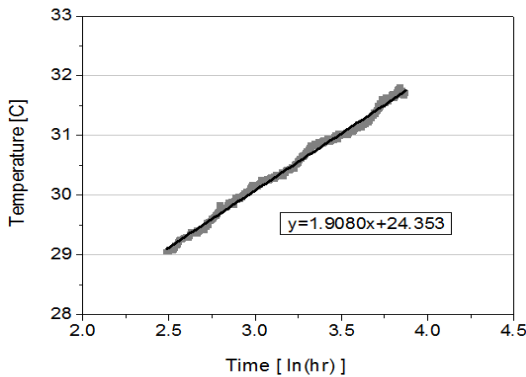
	Case 1			Case 2		
	Test	CFD	$\Delta T$	Test	CFD	$\Delta T$
12 [hr]	26.7	26.2	0.5	26.6	26.4	0.2
24 [hr]	28.0	27.6	0.4	27.9	27.7	0.2
36 [hr]	28.7	28.3	0.4	28.7	28.5	0.2
48 [hr]	29.3	28.9	0.4	29.3	29.1	0.2

### 2.5.2 기울기 비교

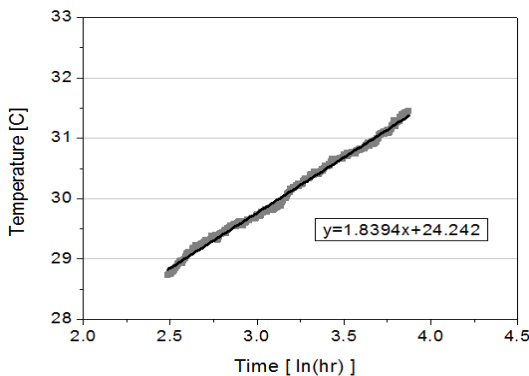
Fig 9와 10에는 CFD 결과값을 이용하여 입구온도와 출구온도의 평균값과 시간을 선형화한 방정식의 기울기를 나타내었다.

현장 열응답 시험 초기에는 열용량이 일정하게 공급되지 않아 약간의 오차를 나타내는 것으로 알려져 있다. 이 세균 등은 현장 열응답 시험시 주요 오차는 대략 초기 12시간 내에 발생되며, 시험 시작 후 초기 12시간을 해석결과 분석에서 제외하는 것이 무난하다고 제안하였다[5].

이에 초기 12시간을 제외한 시험 실측값과 CFD 결과값을 사용하여 2개소의 기울기를 Table 5에 나타내었다. Case 1의 경우 실측값의 기울기는 1.8781이고, CFD 결과값의 기울기는 1.9080으로 1.6%의 차이를 보였고, Case 2의 경우 실측값의 기울기는 1.8151, CFD 결과값의 기울기는 1.8394로 1.3%의 차이를 보여 2개소에서 1.6%이내에서 적절히 예측함을 보였다.



[Fig. 9] Slope from CFD result of Case 1



[Fig. 10] Slope from CFD result of Case 2

[Table 5] Test data and CFD results of Slope

Case 1			Case 2		
Test	CFD	%	Test	CFD	%
1.8781	1.9080	1.6	1.8151	1.8394	1.3

### 3. 결론

본 연구에서는 수직형 지중 열교환기의 3차원 CFD 해석 기법을 제안하여 시뮬레이션을 수행하였고, 2개소의 현장 열응답 시험의 출구온도와 기울기를 비교하였다. 지중 열교환기의 입구온도에 따른 출구온도를 예측하기 위해 지중 물성치 및 경계조건을 설정하고, 현장의 시험 실측값과 CFD 결과값을 비교하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 제안한 CFD 해석 기법을 통해 직경과 깊이가 다른 2개소의 수직형 지중 열교환기 현장 열응답 시험의 3차원 열전달 유동에 대해 적절히 모사할 수 있음을 확인하였다.
- 2) CFD 해석 결과 2개소의 지중 열교환기 출구온도는 0.5℃ 범위 내에서 예측하였고, 기울기는 1.6% 이내에서 적절히 예측함을 보였다.
- 3) CFD 해석 기법을 활용하여 수직형 지중 열교환기에 대한 다양한 조건 변화에 대한 성능 예측에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### References

- [1] S.K. Yim, "The Practical Study of Geothermal Heat Pump System", 2002-N-GE11-P-030.
- [2] Y.B. Lee, S.I. Cho, C.H. Kang, I.K. Jung, C.G. Lee, J.H. Sung, S.O. Chung, Y.B. Kim, "Analysis of Heat Transfer Characteristics in Soil for Development of a Geothermal Heat Exchanger System", Korean Society for Agricultural Machinery, Vol. 30, No. 3, pp. 185~191, 2005
- [3] S.S. Kim, "A Study on the Heat Pump System by using Geothermal Energy", Gyeongsang National University, Doctoral dissertation.
- [4] S.W. Woo, J.H. Kim, S.H. Shin, K.I. Hwang, "The Comparison of the EWT&LWT between Field Measurement and CFD of Vertical-type Geothermal Heat Exchanger", Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 3, No. 1, pp.11~16, 2007
- [5] S.K. Lee, J.S. Woo, D.K. Kim, "A Study of Determining Initial Ignoring Time of Line Source Model used in Estimation the Effective Soil Formation Thermal Conductivities", Journal of Energy Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 167~174, 2008

**이 희 상(Hee-Sang Lee)**

[정회원]



- 1978년 2월 : 숭실대학교 공학사
- 1982년 2월 : 숭실대학교 (공학 석사)
- 1999년 2월 : 국민대학교 (공학 박사)
- 1980년 2월 ~ 2010년 2월 : 인천전문대학 전임강사, 조교수, 부교수, 교수

- 2010년 2월 ~ 현재 : 인천대학교 전임교수

<관심분야>

지열 냉난방 System

---

**심 용 섭(Yong-Sub Sim)**

[정회원]



- 2003년 2월 : 인천대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>

열전달, 신재생에너지