

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 3, 2007

CFD 해석에 의한 수직형 지열교환기의 성능예측

우상우*, 황광일**, 김중현***, 신승호***

*한국해양대학교 대학원(wooessy@nate.com), **한국해양대학교 기계정보공학부(hwangki@hhu.ac.kr)

***삼성물산 건설부문 기술연구소(kjh5955@samsung.com, seungho.shin@samsung.com)

A Performance Prediction of a Vertical-type Geothermal Heat Exchanger by CFD Analysis

Woo, Sang-Woo*, Hwang, Kwang-Il**, Kim, Joong-Hun***, Shin, Seung-ho***

*Graduate School of Korea Maritime University(wooessy@nate.com),

**Div. of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime University(hwangki@hhu.ac.kr),

***Research of Technology, Samsung E&C(kjh5955@samsung.com, seungho.shin@samsung.com)

Abstract

This study proposes a CFD(Computational Fluid Dynamics) analysis as a method of verification of the designed-data and a supplement of the insufficient experiences in geothermal system, which shows a rapid growth among the renewable energies. The followings are the results.

FLUENT 6.2.12 is used as a CFD tool on this study, with the equations of continuity, motion, energy for unsteady flow through pipes and k-epsilon turbulent model. S-type model which has one borehole with diameter 12m by depth 206m and T-type model which has 3 boreholes with 12m×20m×206m are proposed, and also the boundary conditions are described. The temperature differences between temperatures by CFD analysis and by on-site measurement are less than 1.5%, this shows a high reliability of CFD analysis process which this study proposes. After 11 days simulation operated 12 hours interval On/Off mode, it is clearly predicted that the outlet temperatures of geothermal pipes are increased by 1.2°C, and 2.2°C after 4 months. And the outlet temperatures of geothermal pipes increased with increase of the mass flow rates through the pipes. T-type model shows that the 4m distance between boreholes are reasonable because the temperatures at 2m and 6m from borehole are nearly same.

Keywords : 지열에너지(Geothermal energy), 지열교환기(GHEX, Geothermal Heat Exchanger)
전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)

접수일자 : 2007년 8월 27일, 심사완료일자 : 2007년 8월 17일

교신저자 : 황광일(hwangki@hhu.ac.kr)

기 호 설 명

- k : 열전도율 [W/m·K]
 slope : 순환유체의 입·출구온도의 평균값과 시간을 선형화한 방정식의 기울기
 ΔT : 지열교환기의 입·출구 온도차 [°C]
 EX : 현장측정, 실측
 SI : 시뮬레이션, CFD 해석
 EWT : 작동유체가 히트펌프에서 지열교환기로 들어가는 입구온도 [°C]
 LWT : 작동유체가 지열교환기에서 히트펌프로 나가는 출구온도 [°C]
 BH : 보어홀, 천공(穿孔)

1. 서론

1.1 연구배경과 목적

2004년 3월에 발효된 “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법”은 3,000m² 이상 규모의 신축 공공건물에 대해 총건축공사비의 5% 이상에 해당하는 신재생에너지 활용시스템을 반드시 적용해야 함을 규정하고 있고¹⁾, 동법의 시행이후 법에서 규정하고 있는 11개 신재생에너지 관련 기술개발과 보급사업이 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 지열에너지를 활용한 시스템(이후 지열시스템으로 표기)이 가장 주목을 받는 이유는, 기술적용 지역에 제한이 적고 잠재된 부존량이 무한하며 또한 현실적으로 11개 신재생에너지 중 기자재 국산화율이 가장 높기 때문이다.

그러나 국내에는 200여개 이상의 전문업체가 지열시스템 관련 사업을 추진하고 있음에도 불구하고, 높은 기자재 국산화율과는 달리, 설계 수준이 미국, 유럽 등에 비해 낮게 평가되고 있다. 이는 대부분의 국내 지열시스템이 최근 2~3년 이내에 보급되었기 때문에 각 현장의 특성을 고려한 경험적 설계데이터가 데이터베이스(DB)로 구축되어 있지 않고 또한 설계에 대한 검증능력이 부족하여

외국의 경험과 기술에 의존하는 현실로 나타나고 있다.

이에 본 연구에서는, 부족한 경험적 설계데이터를 보완하고 설계 결과를 검증하기 위한 방법으로써, 지열시스템에서의 CFD 해석 기법을 제안하고, 이로부터 도출된 해석값과 현장의 실측값을 비교 평가하여 신뢰도를 확보하며, 또한 현장 실험실측이 어려운 조건변화에 대한 예측이 가능함을 제시하고자 한다.

1.2 연구문헌 고찰

본 연구와 유사한 국내 연구로써는 이세균 등¹⁾이 수평형 지열교환기에 의한 지중 열유동에 관한 CFD 해석을 통하여 파이프간 매설간격은 50cm, 파이프 코일의 피치는 40cm가 적합함을 제안하였고, 또한 이용범 등²⁾은 수직형 지열교환기와 그 주위의 열거동을 해석하기 위해 제시한 1차원 열전달 모델의 타당성을 실험을 통해 검증하였다. 한편, 값비싼 천공 비용으로 인해 지열시스템 보급이 낮은 일본에서는, Ooka 등³⁾이 지중의 열과 수분 이동을 해석하는 상용 프로그램(FEFLOW)에 지열교환기 모듈을 접목시켜 해석결과의 정밀도를 향상시키는 방법을 제안하였고, Yamaguchi 등⁴⁾은 주택 보급용 4m 깊이 수직형 지열교환기의 성능에 대한 모델 제안과 실험적 검증을 수행하였다.

그러나 국내에서 지열시스템 기술개발에 CFD 해석 등 전산 시뮬레이션 기법을 이용한 사례는 더 이상 찾아보기 어려우며, 상기한 일본은 화산 지반에 따른 구조적 문제로 인해 천공깊이가 낮은 반면 국내에서는 수직형의 경우 일반적으로 200m 전후 깊이를 천공하고 있기 때문에 국내에서의 적용성이 매우 낮게 평가되고 있다.

1.3 연구의 범위와 방법

본 연구에서는 지열시스템의 주요 구성요소인 지열교환기의 열전달 성능과 지중 온도변화를 예측하기 위한 3차원 CFD 해석 모델을 제안하고,

연속운전 조건에서의 시뮬레이션 결과와 실측값을 비교함으로써 제안 모델의 신뢰성을 확보한다.

이를 바탕으로 운전시간, 지열교환기 내 유동유량, 보어홀 간격의 변화에 따른 지열교환기 입출구의 온도변화와, 지열교환기 주변 지중온도변화에 대한 예측을 수행한다.

2. 현장 및 시뮬레이션 개요

2.1 현장개요

본 연구에서 제안한 CFD 해석 기법의 신뢰성을 확인하기 위해 실측된 현장의 개요는 다음과 같다. 서울시에 소재하는 본 현장은 그림 1, 그림 2에 보이는 것처럼 4개 동(棟)으로 구성되어 있으며, 그 중 D동(공동제작센터)의 냉난방부하는 지열시스템만으로 공급하도록 계획되어 있다. 현장 전체와 D동의 개요 및 냉난방설계부하를 표 1에 정리하였다.

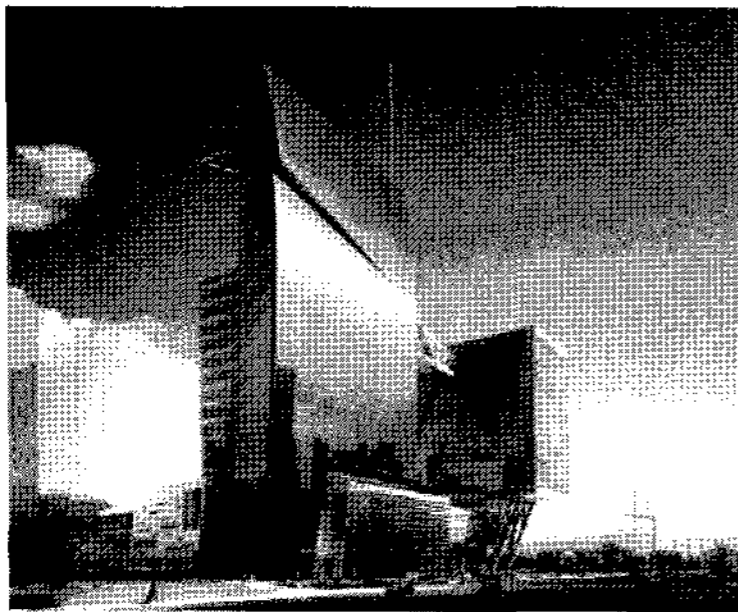


그림 1. 현장 조감도(전체)



그림 2. 현장 시공현황

표 1. 현장개요

		서울시	
전체	위치		
	규모	①대지면적 : 19,138m ² ②건축면적 : 11,478m ² ③연면적 : 152,569m ² ④지하4층, 지상22층 4개 동	
	용도	업무시설, 교육연구시설, 전시시설, 판매시설	
D동	규모	①연면적 : 9,499m ² ②지상4층	
	용도	공동제작센터	
	설계부하	냉방	1,210Mcal/h
난방		490Mcal/h	

본 현장에서는 D동의 냉난방열을 지열시스템으로 공급하기 위해, 최대냉방설계부하(400RT)를 장비선정 기준으로 하였다. 이를 위해 그림 2에 표시된 BH #1 → #2 → #3 → #4의 현장 외곽을 따라 깊이 210m, 간격 4m, 1열로 112공(孔)을 천공하였고, HDPE 재질의 지열교환기를 매설하였으며 16% 벤토나이트(bentonite)를 사용하여 그라우팅(되메우기, grouting)하였다. 또한 지열원히트펌프 25RT × 16대와 지열교환기측과 실내측에 각각 4대의 순환펌프를 설치하였고, 운전방식은 실내냉난방부하량을 추종하는 대수제어방식을 계획하고 있다.

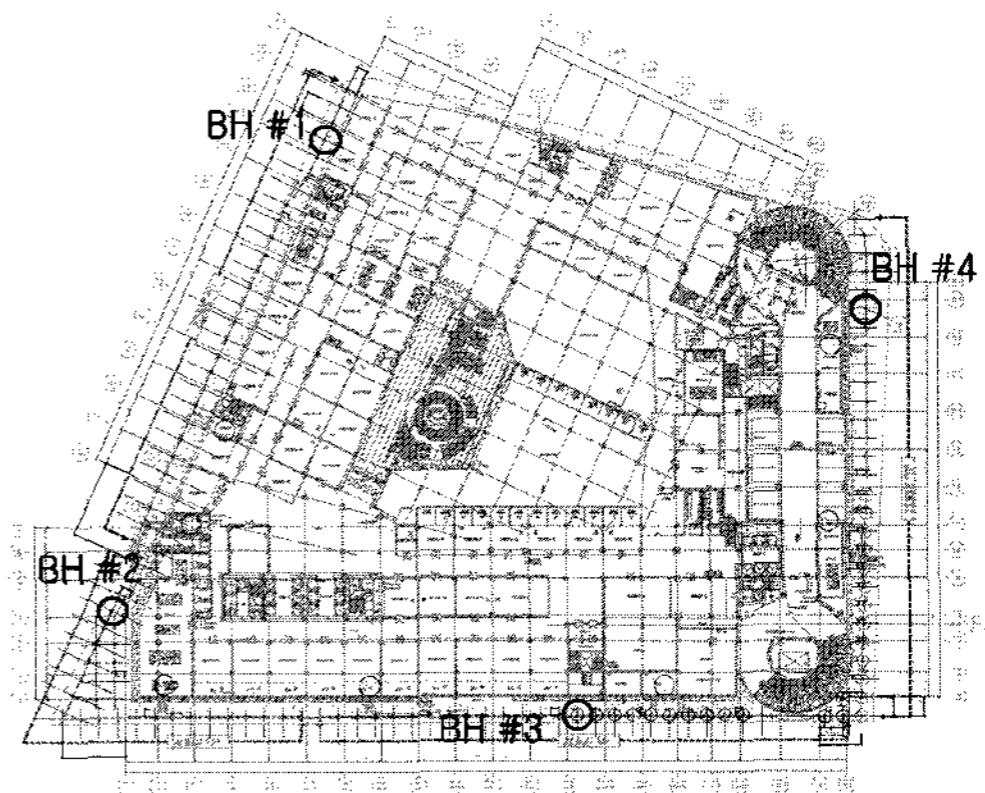


그림 3. 현장 평면배치 및 시험천공 위치(BH#1~#4)

2.2 시뮬레이션 개요

CFD 해석을 위해 본 연구에서는 상용코드인 FLUENT Version 6.2.16를 사용하였으며, 모델 해석과정에서는 비정상 유동에 대한 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 그리고 k-epsilon 난류모델을 이용하였다. 운동량방정식 해석을 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, SIMPLE 알고리즘의 계산순서는 그림 4와 같다.

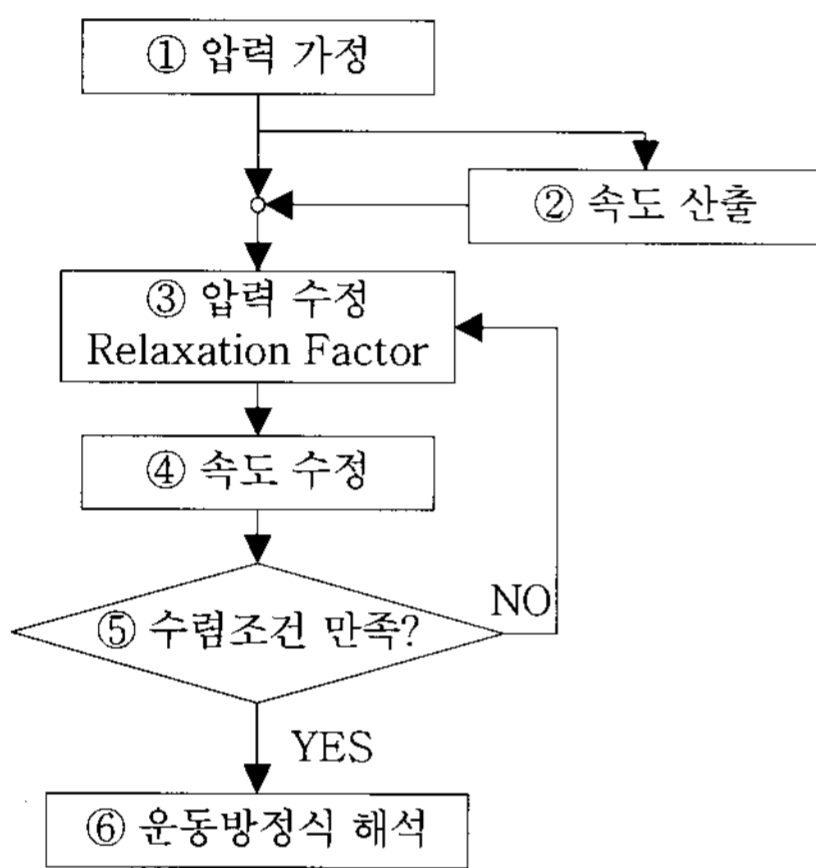


그림 4. SIMPLE 알고리즘의 흐름도

(1) 시뮬레이션 모델링

본 연구에서는 천공 부근과 지열교환기의 열성능을 해석하기 위해 지중을 실린더 형태로 형상화한 지중실린더(Ground cylinder)형 단일천공 모델(이하 S형 모델로 표기)을 작성하였다. 이 모델은 직경 12m, 깊이 206m 크기이고, 모델 중심부에는 직경 150mm, 길이 200m의 천공, 그리고 천공의 중앙에 직경 30mm의 지열교환기가 38mm 간격을 갖는 U자형으로 위치하고 있다. 이 모델의 해석을 위해 3D 모델링 및 격자 생성 프로그램인 GAMBIT Ver.2.3.16을 활용한 결과 그림 5에 나타난 것과 같이 약 40만개의 혼합격자(Mesh)가 생성되었다.

또한 인접한 천공 간의 열간섭과 지열교환기의 열성능을 해석하기 위해 3개 천공 모델(이하 T형

모델로 표기)을 생성하였다. 이 모델은 가로 20m, 세로 12m, 깊이 206m의 크기를 갖는 6면체 형상이며, S모델과 동일한 천공 및 지열교환기를 4m 간격으로 3개 포함하고 있다. 이 모델은 그림 6에 보이는 것과 같이 GAMBIT에 의해 총 80만개의 혼합격자로 구성되었다.

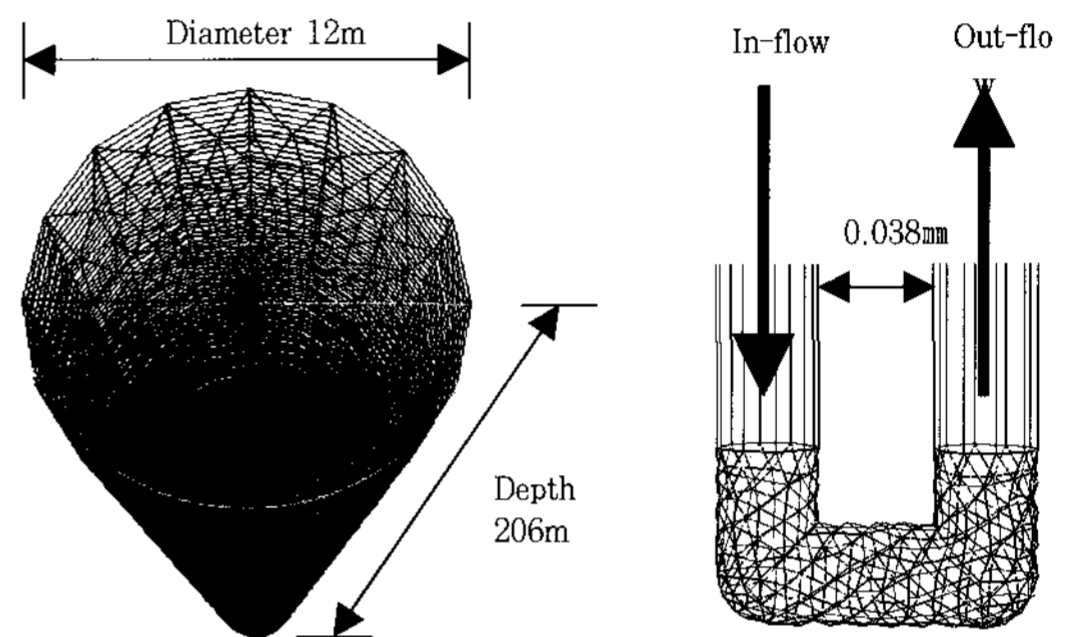


그림 5. 1개 천공을 갖는 S형 모델의 혼합격자와 모델 내 매립된 지열교환기 U자관(부분)의 혼합격자

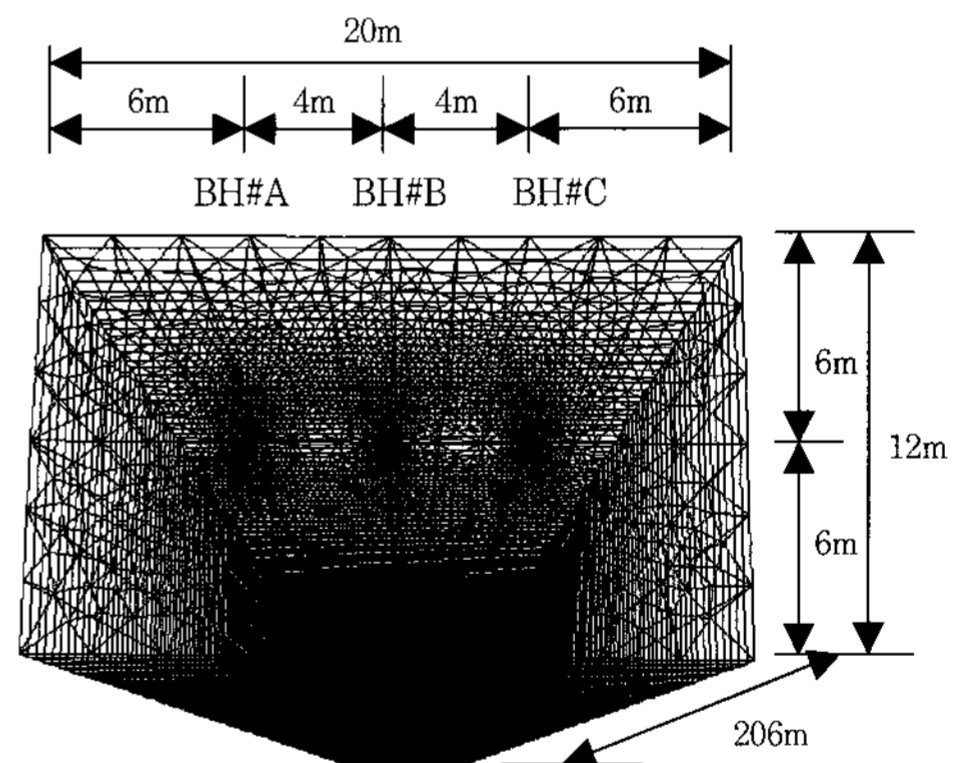


그림 6. 3개 천공을 갖는 T형 모델의 혼합격자

(2) 시뮬레이션 경계조건(Boundary condition)

본 연구의 목적에 적합한 CFD 해석을 위해 지중온도, 지열교환기 내의 유량 및 운전조건 등의 경계조건을 다음과 같이 설정하였다.

본 시뮬레이션에서는 모델의 상부 표면이 심도 5m에 위치하고 항상 15°C의 온도를 갖는 조건으로 설정하였다. 이는 본 현장의 경우 지표면 이하

4m의 트렌치(Trench)에서 상부연결관과 연결되고, 서울시의 지중온도는 심도 5m 이하에서 연중 약15°C 정도로 거의 일정하게 유지되기 때문이다.⁵⁾ 각 모델의 측면과 하부면의 온도 조건은 서울시의 평균지온경사가 약25°C/km⁶⁾임을 활용하여 심도 5m에서는 15°C, 심도 205m에서는 20°C가 되도록 지중온도를 설정하였다.

한편, 지열교환기측의 전체설계유량으로부터 산출해 낸 각 천공에 매설된 1개 지열교환기 내 순환유량은 약 0.836kg/s이며, 순환펌프는 12시간 간격의 간헐운전으로 가정하였다.

3. CFD 해석 및 검증

3.1 현장 열전도테스트 결과

본 현장에서는 112개의 천공 중 그림 3에 표시된 4개 천공(BH#1, BH#2, BH#3, BH#4)에 대해 2006년 8월 23일부터 9월 3일까지 열전도테스트를 수행하였다. 계측에 사용된 온도계의 정밀도는 ±0.3°C이고 입력전원의 편차를 최소화하기 위해 전압안정기를 사용하였다.

측정개요 및 결과를 정리한 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 천공별 열전도계수는 2.94W/m·K, 3.35W/m·K, 3.12W/m·K, 2.95W/m·K로 나타났고, 이로부터 현장 전체의 평균열전도계수는 3.09W/m·K로 평가되었다.

표 2. 열전도테스트 결과

	BH #1	BH #2	BH #3	BH #4	평균
운전시간 [min]	2,883	2,883	2,883	2,883	-
유량 [lpm]	47.7	46.9	47.5	48.1	47.5
평균소비전력 [W]	3253	3266	3175	3237	-
온도기울기(s)	0.4317	0.3809	0.3977	0.4285	-
열전도계수 [W/m·K]	2.94	3.35	3.12	2.95	3.1

주) 온도기울기(s): 평균지열교환기내 온도와 시간간의 관계를 선형적으로 나타내는 값

3.2 CFD 해석 결과

CFD 해석결과의 신뢰성을 확인하기 위해, S형 모델에 2.2절의 경계조건과 3.1절의 지중 열전도계수를 대입하여 CFD 해석을 수행하였다.

본 연구에서는, 실측한 지열교환기의 입구온도와 유량의 각 초기값을 시뮬레이션의 초기조건으로 설정한 후 48시간(2,880분) 동안의 연속운전에 따른 지열교환기의 입구온도와 출구온도를 예측하고 이를 현장에서 실측한 지열교환기의 입구온도, 출구온도와비교하는 방법으로 신뢰성을 확인하였다. 4개 천공의 각 예측결과와 실측결과는 그림 7~10과 같다.

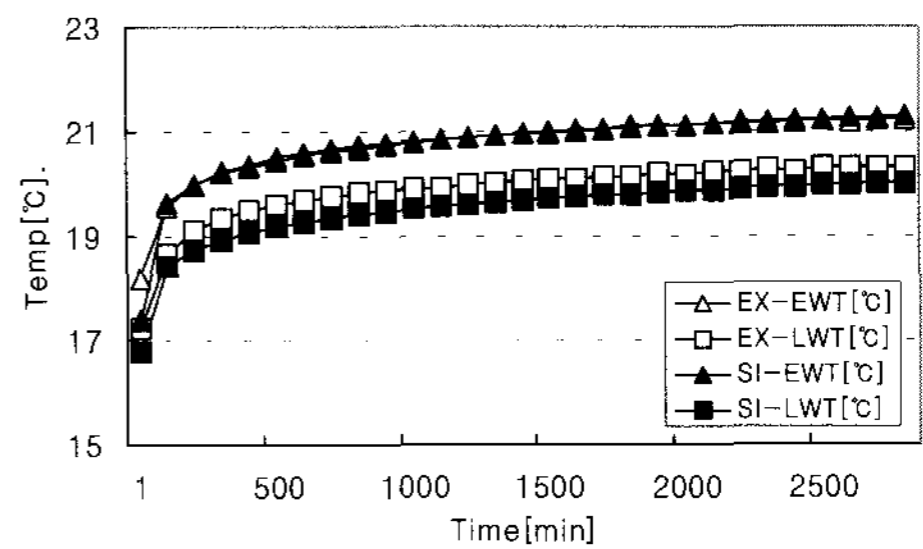


그림 7. BH#1 천공의 실측값과 시뮬레이션 해석값

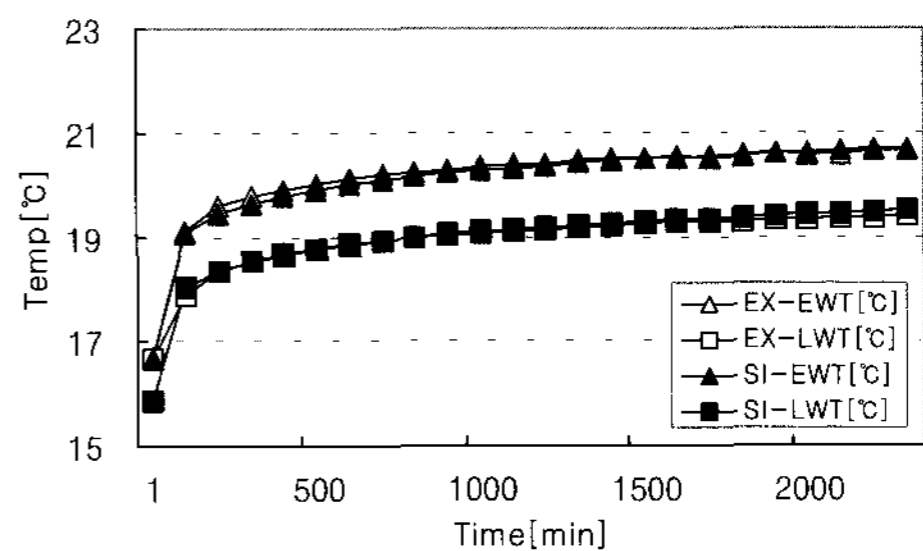


그림 8. BH#2 천공의 실측값과 시뮬레이션 해석값

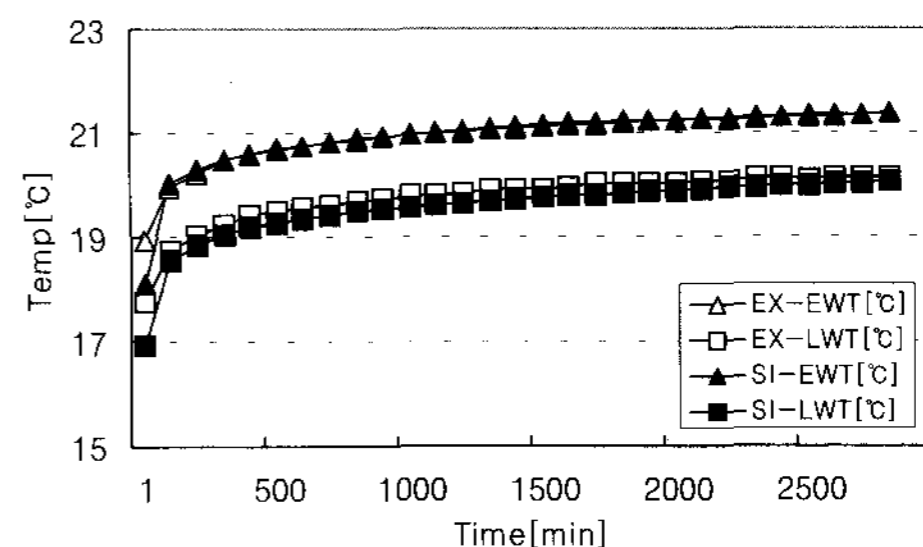


그림 9. BH#3 천공의 실측값과 시뮬레이션 해석값

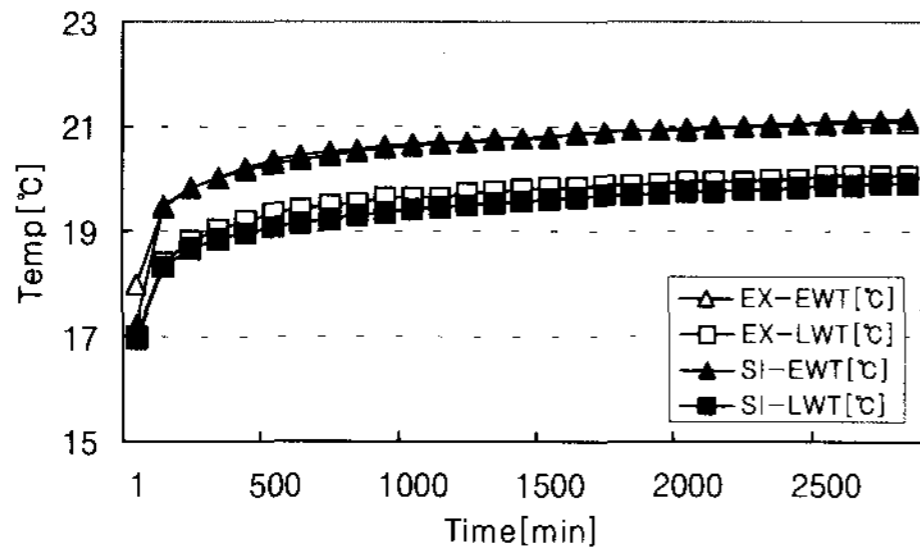


그림 10. BH#4 천공의 실측값과 시뮬레이션 해석값

각 천공의 운전시간 2000분이 경과한 후의 실측과 CFD 해석결과의 차이를 표 3에 정리한다. 본 연구에서 제안한 S형 모델과 경계조건에 의한 출구온도 예측결과와 천공, BH#1~#4의 출구온도 실측결과 사이에는 0~0.4°C, 비율로 표현하면 0~1.5%의 차이만을 보이고 있기 때문에 본 연구에서 제안한 모델링 방법의 신뢰성이 매우 높은 것으로 판단할 수 있다.

표 3. 지열교환기 입·출구온도 (2,000분 경과 후)

		예측값[°C]	실측값[°C]	차이[°C]
BH #1	입구	21.1	21.1	0.0
	출구	19.9	20.2	0.3
	온도차	1.2	0.9	0.3
BH #2	입구	20.5	20.5	0.0
	출구	19.3	19.2	0.1
	온도차	1.2	1.3	0.1
BH #3	입구	21.2	21.3	0.1
	출구	19.9	20.0	0.1
	온도차	1.3	1.3	0.0
BH #4	입구	21.0	20.9	0.1
	출구	19.7	20.0	0.3
	온도차	1.3	0.9	0.4

4. CFD 해석에 의한 성능예측

2.2절의 경계조건과 3.1절의 지중 열전도계수, 그리고 지열교환기 입구온도의 초기값 35°C를 조건으로 설정하고,⁷⁾ 간헐운전, 유량변화(이상 S형

모델), 천공 간의 거리(T형 모델)에 따른 지열교환기 입·출구온도와 지중온도분포를 예측하였다.

4.1 간헐운전에 따른 성능변화 예측

본 현장이 업무시설임을 고려하여 12시간 가동, 12시간 정지를 반복하는 간헐운전방식으로 예측기간 11일의 시뮬레이션을 수행하였다.

(1) 지열교환기 출구온도

11일 동안의 지열교환기 출구온도에 대한 예측 결과는 그림 11과 같다. 지열교환기의 최대출구온도가 1일차 운전에서는 약 28.4°C, 11일차 운전에서는 약 29.6°C로 예측됨에 따라 11일간의 운전으로 인해 최대출구온도가 약 1.2°C 상승함을 알 수 있다. 이 결과를 이용하여 냉방기간(4개월) 동안의 지열교환기 최대출구온도 변화를 검토하면 그림 12에 나타난 것과 같이 28.4°C에서 30.6°C로 2.2°C 상승할 것으로 추측된다.

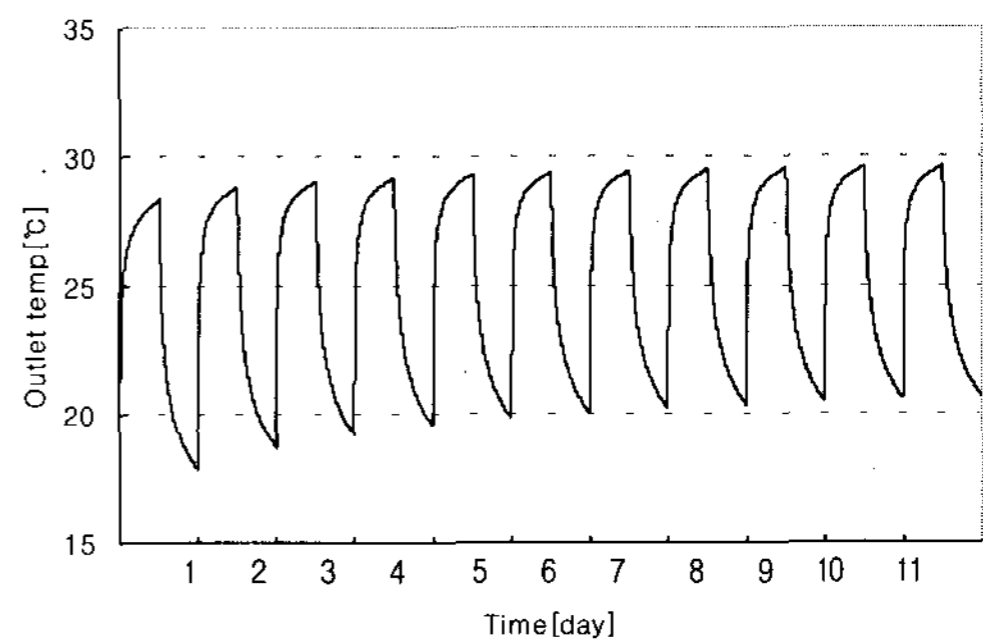


그림 11. 간헐운전 시의 지열교환기 출구온도(예측)

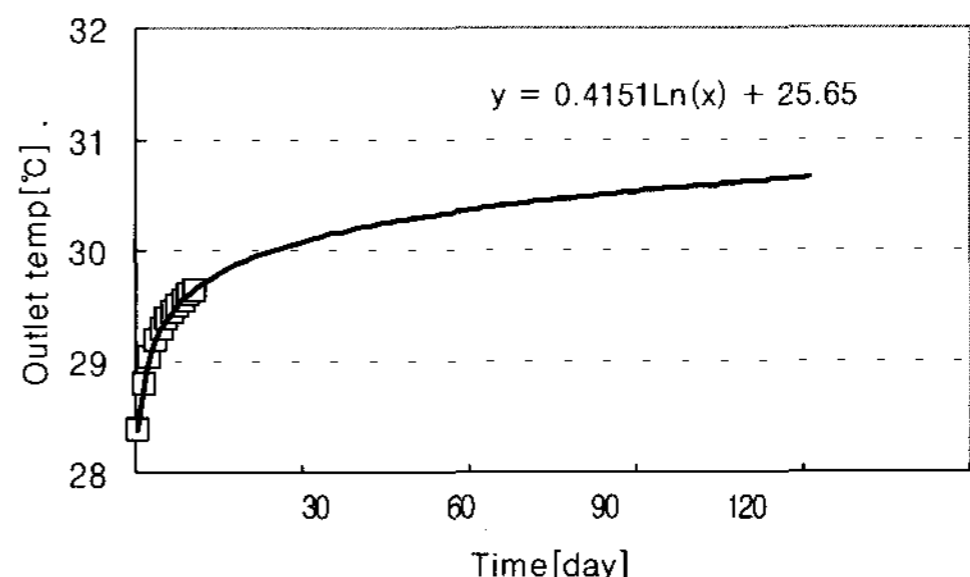


그림 12. 냉방기간 동안의 지열교환기 출구온도(예측)

(2)지중온도분포

가동 중인 시간(12시, 252시)과 정지 중인 시간(24시, 264시)의 천공 깊이별 천공 주변의 지중온도분포를 그림 13과 14에 표시하였고, 그림에서 x축은 천공 중심(x=0)으로부터의 거리를 의미한다. 천공으로부터 수평거리 3m 이내에서는 가동상태, 정지상태 모두 시간이 경과함에 따라 지중온도가 상승하고 있다. 또한 천공 깊이별 시간경과에 따른 지중온도의 차이는 천공 깊이와 반비례하며, 수평방향으로는 운전초기(12시, 24시)에 비해 운전시간이 경과(252시, 264시)함에 따라 지중온도가 변하는 범위가 1m에서 3m까지 확대되고 있음을 보여주고 있다.

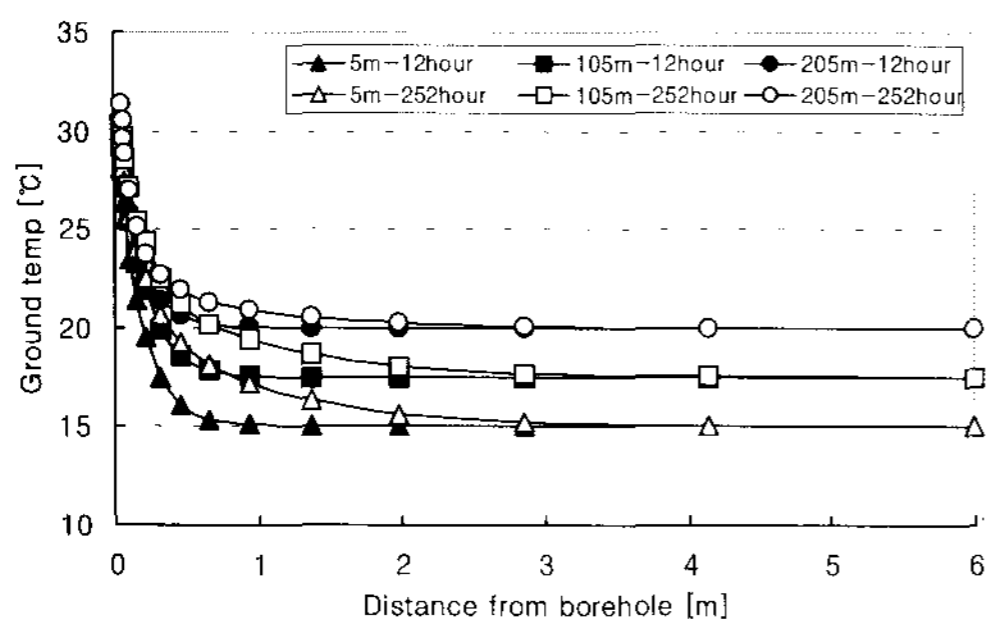


그림 13. 가동 시의 천공 깊이별 지중온도분포(예측)

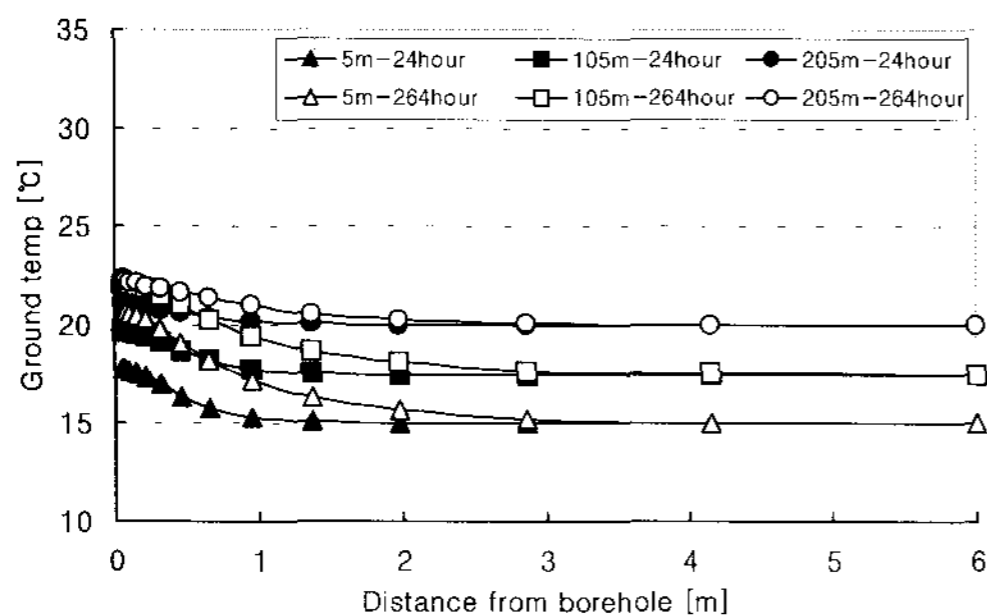


그림 14. 정지 시의 천공 깊이별 지중온도분포(예측)

4.2 유량에 따른 출구온도

지열교환기 내 순환유량 변화에 따른 지열교환기 출구온도를 예측하였다. 순환유량은 검증 현장

의 설계유량인 0.836kg/s을 기준으로 $\pm 0.2\text{kg/s}$ 씩 변화를 준 0.636kg/s과 1.036kg/s로 설정하였고, 시뮬레이션 결과를 그림 15에 표시하였다.

가동시간대(On)에서는 순환유량이 0.636kg/s, 0.836kg/s, 1.036kg/s로 증가할수록 출구온도도 27.7°C, 29.0°C, 30.0°C로 높게 나타나고 있다.

4.3 이격거리에 따른 출구온도와 지중온도

지열시스템을 설계하는 대부분의 현장에서는, 천공 간격을 좁게 할 경우 지열교환기의 성능저하가 발생할 것으로 판단하여, 천공 간격을 4m 이상으로 설정하고 있다. 본 연구에서는 그림에 제시한 것과 같이 4m 간격으로 3개 천공이 1열로 배열하고 있는 T형 모델을 이용하여 출구온도와 지중온도분포를 해석하였다.

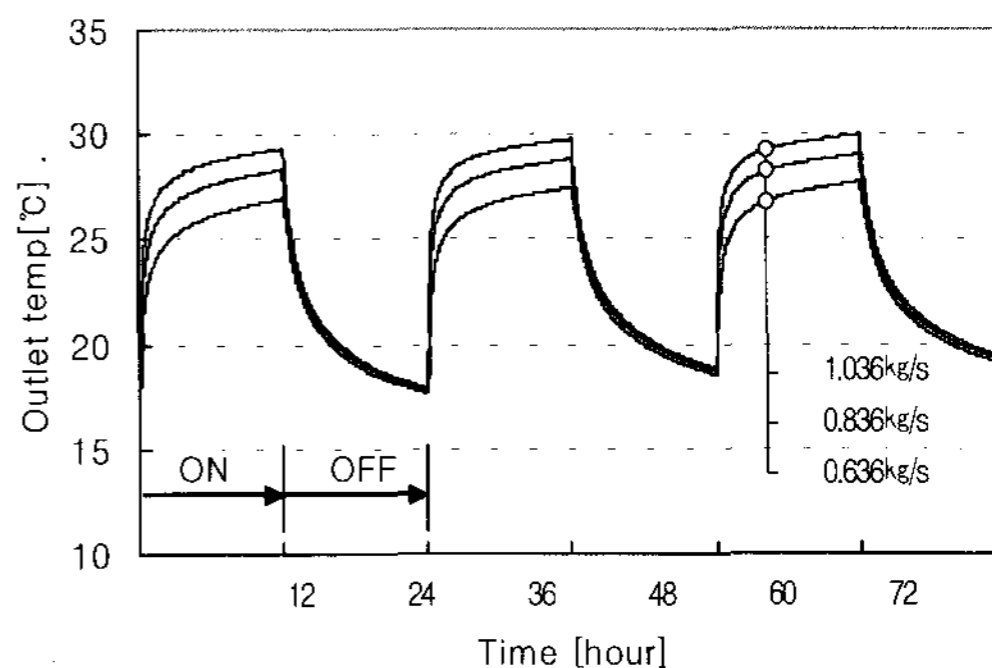


그림 15. 지열교환기 내 유량변화에 따른 출구온도(예측)

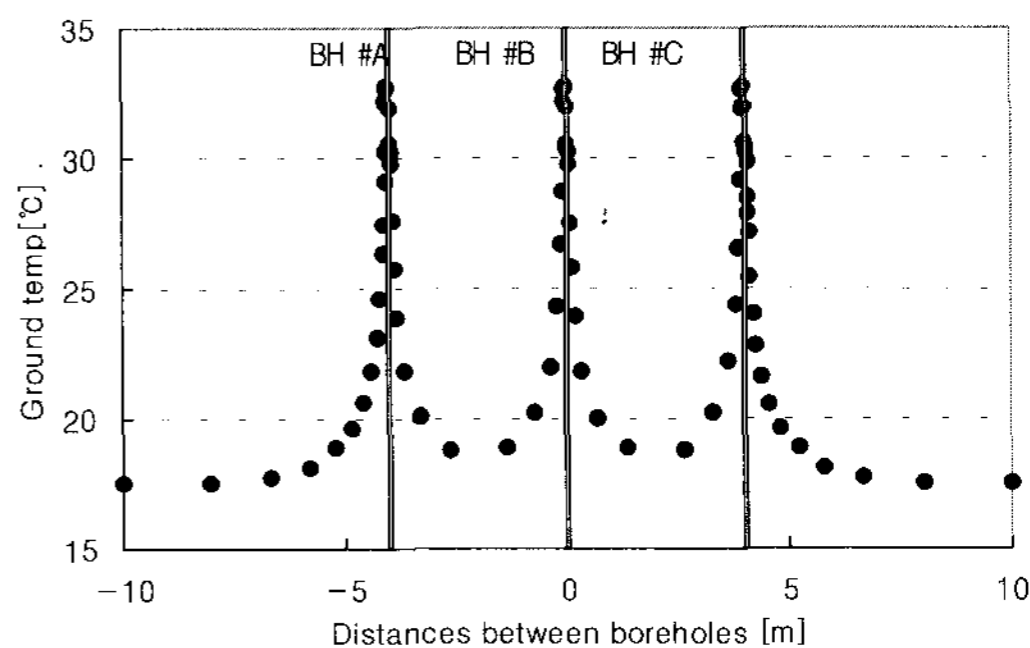


그림 16. 천공 사이의 지중온도분포(예측)

T형 모델의 BH #A, #B, #C에 매설되었다고 가정된 지열교환기의 출구온도를 예측기간 11일 동안으로 설정하여 해석한 결과는 그림 11에 나타난 단일 천공을 갖는 S형 모델의 지열교환기 출구온도와 동일하게 나타났다.

지중온도분포는 x축은 BH #B를 중심($x=0m$)으로 BH #A($x=-4m$), BH #C($x=4m$)의 거리를 나타내고 y축은 천공 깊이 100m 지점에서의 수평방향 온도를 나타낸 그림 16과 같다. 그림에서 보이는 바와 같이 지열교환기에서 방출되는 열량에 의한 천공 주변 약 2m 범위에서의 온도와 BH #A, BH #C로부터 6m 떨어진 -10m, 10m 지점에서의 지중온도는 18°C 정도에서 거의 유사하게 나타나고 있다.

지열교환기 출구온도와 지중온도분포 해석으로부터 현재 현장에서 시공되고 있는 천공 간격 4m에서는 천공 상호간에 열간섭을 받지 않고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 급속히 보급되고 있는 지열시스템 분야에서 부족한 경험적 설계데이터를 보완하고 설계 결과를 검증하기 위한 방법으로써 지열시스템에서의 CFD 해석 기법을 제안한 것이다. 연구성과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) CFD 해석을 위한 단일천공모델(S형 모델)과 3개 천공을 갖는 다천공모델(T형 모델)을 제안하였고, 경계조건을 설정하였다.
- 2) CFD 해석에 의한 지열교환기의 출구온도와 현장실측을 통한 지열교환기 출구온도의 차이가 1.5% 이하로 나타남에 따라 본 연구에서 제안한 CFD 해석 방법의 높은 신뢰도를 확인하였다.
- 3) 예상기간 11일 동안의 12시간 단위 간헐운전에 대한 CFD 해석을 통해, 지열교환기 출구온도는 11일간의 운전으로 인해 약 1.2°C 상

승하고, 4개월의 냉방기간 후에는 2.2°C 상승할 것으로 추측된다. 또한 천공으로부터 수평거리 3m 이내에서는 시간이 경과함에 따라 지중온도가 상승함을 알 수 있다.

- 4) 지열교환기 내 순환유량 변화에 따른 지열교환기 출구온도를 예측한 결과, 순환유량이 0.636kg/s, 0.836kg/s, 1.036kg/s로 증가할수록 지열교환기의 출구온도도 27.7°C, 29.0°C, 30.0°C로 높게 나타나고 있다.
- 5) 4m 간격으로 3개 천공이 1열로 배열하고 있는 T형 모델을 이용한 지열교환기 출구온도와 지중온도분포를 해석한 결과, 지열교환기의 출구온도는 단일 천공을 갖는 S형 모델의 지열교환기 출구온도와 동일하게 나타났다. 또한 천공 사이 약 2m 지점에서 온도와 모델의 바깥쪽 경계 지점에서의 지중온도는 18°C 정도에서 거의 유사하게 나타나고 있다. 이를 통해 현재 설계에 적용되고 있는 최소 천공 간격 4m에서는 천공 상호간에 열간섭을 받지 않고 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

1. 이세균 외, "1차원 모델에 의한 지중열교환기의 열거동 해석", 한국태양에너지학회 논문집, Vol.25, No.1, pp.97~104, 2005.3
2. 이용범 외, "지열 열교환시스템 개발을 위한 지중 열유동 특성분석", 바이오시스템공학, Vol.30, No.3, pp.185~191, 2005
3. 大岡龍三 外, "地中熱移動シミュレーションに基づく採熱量予測モデルの開発", 日本建築學會學術講演梗概集, 日本建築學會, 2007.8
4. Shinji Yamaguchi, Isao Takashima, "Operation Data Analysis of Shallow Depth Ground-Source Heat Pump System at Ogatamura and Takanosu, Akita Prefecture, Japan", Proceedings World

Geothermal Congress 2005

5. 신치웅, “공기조화설비”, 기문당, 1996
6. 김형찬, “한반도 지온특성과 암상과의 관련성 연구”, 박사학위논문, 충남대학교, 1990
7. Stephen P. Kavanaugh, Kevin Rafferty, “Ground-Source Heat Pumps : Design of

Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings”, ASHRAE, 1997

8. 황광일 외, “주상복합 건축물의 기초슬래브에 설치된 수평형 지열교환기의 계절별 성능평가”, 한국태양에너지학회 논문집, 2007. 6, pp.11 ~18