

EnergyPlus를 이용한 지열 열펌프 냉난방 시뮬레이션

신영기

세종대학교 기계공학과 교수

1. 서론

건물 냉난방 시 현재 적용 가능한 에너지원은 태양열과 지열이다. 지층은 거대한 축열조 역할을 하므로 냉난방 에너지 절약을 위해 필수적으로 활용해야 할 대상이다. 지열을 활용하기 위한 지중열교환기는 시공비가 많이 소요되므로 사전에 정확한 해석을 통해 올바른 설계가 이루어져야 한다. 열펌프의 성능은 열교환 온도에 따라 변하고 지중 온도도 교환되는 열량에 따라 변하므로 열펌프 성능의 동특성을 예측하려면 외기온도와 지중온도의 동적 거동이 반영될 수 있는 시뮬레이션 모델이 필요하다. 특히 외기와 건물부하 특

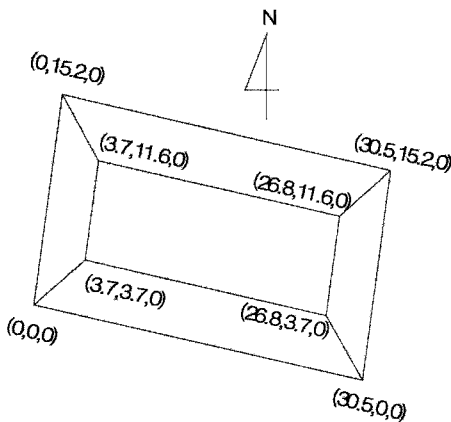
성이 열펌프 운전 동특성에 미치는 영향이 크므로 건물 부하 모델과 연계된 지열 열펌프 성능모사 모델이 필요하다. 다양한 상업용 프로그램들이 있겠지만 본고에서는 미국 에너지성 (DOE; Department of energy)에서 무료로 배포하는 건물 부하 시뮬레이션 프로그램인 EnergyPlus⁽¹⁾를 활용한 연구사례를 소개하고자 한다.

2. 대상 건물 및 HVAC 시스템 구조

지열 열펌프와 지역 냉난방 열원을 이용하여 5개의 공조구역을 처리한다. 지역은 국내를 적용하는 것이 좋으나 이용한 가능한 기후 데이터가 미국 지역에 국한되어 있는 관계로 시카고 오페어 (OHare) 국제공항 지역을 대상으로 하였다. 건물은 북동향으로 30도 기울어져 있고 건평이 463.6 m² 인 1층 건물이다. 건물 평면도와 5개 공조 구역은 그림 1과 같다.

건물 내부 열취득은 다음과 같이 구성하였다. 조명은 1.5 W/ft², 사무실 기기는 1.0 W/ft², 그리고 건평 100 ft²당 재실자 1명으로 가정하였다. 따라서 주어진 건물에 대하여 조명부하는 7,500 W이고 재실자는 50명이다. 환기율은 시간당 0.25회 (ACH; air change per hour)로 설정하였다. 그 외 건물 외벽, 창호 구조 등은 일반적인 표준형이므로 구체적인 사항에 대한 언급은 생략한다.

그림 2는 해당 건물에 적용된 공조설비 구조를



[그림 1] 건물 평면도 및 공조구역

나타낸다. 각 공조구역은 외기 이코노마이저와 온수 재열히터가 구비된 표준 변풍량 시스템으로 설비되어 있다. 중앙공조 방식으로서 AHU(air handling unit)에서 처리된 공기는 zone air supply splitter를 거쳐 각 공조구역으로 배분된다. 냉난방 부하는 주로 지열을 활용한 열펌프에서 처리되지만 일부 부하는 지역 냉난방 (district heating and cooling) 열원을 활용하여 처리하는 구조이다.

3. 열펌프 및 지중 열교환기 모델

3.1 열펌프 모델

그림 2에 적용된 열펌프는 'Hui Jin의 박사학위' 논문에서 개발된 parameter estimation model^[2]을 적용하였다. 모델의 핵심은 다변수 최적화 알

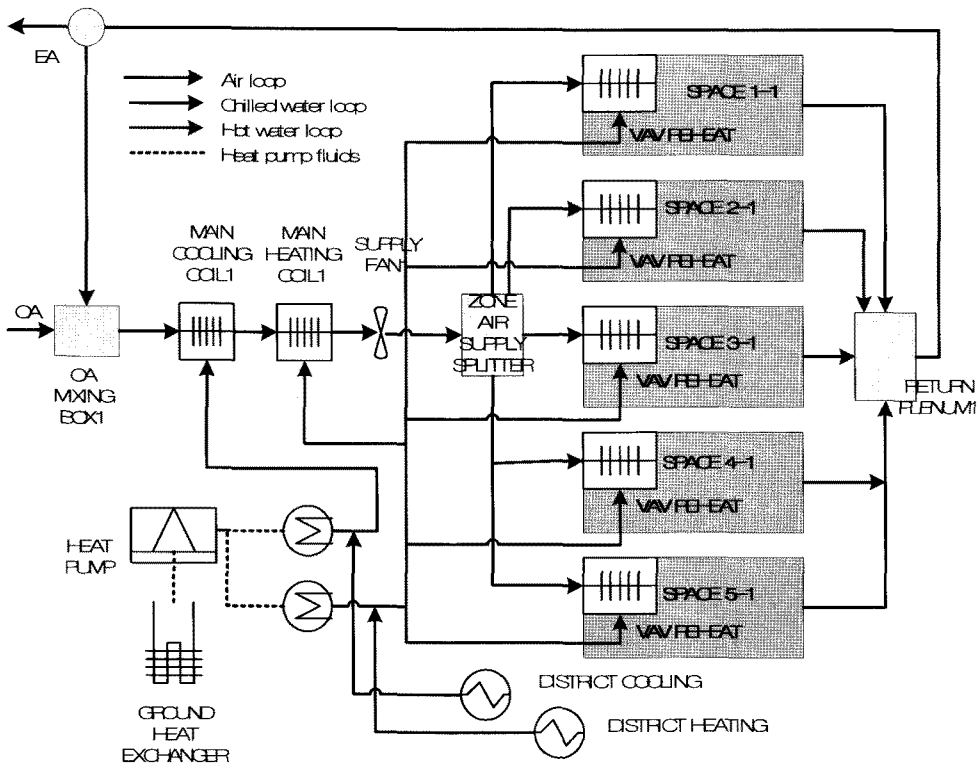
고리즘을 적용하여 명시되지 않은 몇 개의 미지 변수를 추정하는 것이다. 모델의 목적은 열펌프 구성 부품의 물리적 외형과 작동을 반영하고 실제로 작동 중인 열펌프의 성능을 모사하는 것이다. 팽창밸브 및 압축기 입출구 밸브에서의 압력 강하를 등엔탈피 과정으로 가정하면 열평형 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{Q}_s = \dot{W} + \dot{Q}_L \quad (1)$$

여기서 \dot{Q}_s 는 공급측 열전달율, \dot{Q}_L 는 부하측 열전달율, \dot{W} 는 압축기 동력을 나타낸다.

압축기 내 과정은 그림 3과 같이 등엔트로피 과정으로 가정하면

$$PV^\gamma = constant \quad (2)$$



[그림 2] 지중 열펌프를 이용한 건물 냉난방 구조

여기서 P 는 압력, V 는 체적을 나타낸다.

그림 3의 간극체적 내 냉매증기는 재팽창 과정을 거치기 때문에 압축기 냉매의 질량 유량은 압축비에 대하여 단조감소 함수이다.

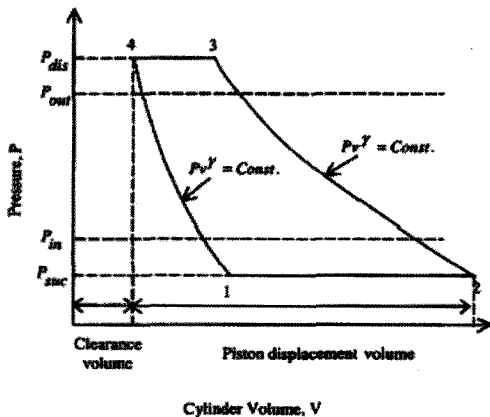
$$\dot{m} = \frac{PD}{v_{suc}} \left[1 + C - C \left(\frac{P_{dis}}{P_{suc}} \right)^\gamma \right] \quad (3)$$

여기서

- \dot{m} : 냉매 질량 유량
- PD : 피스톤 행정체적
- C : 간극 인자 (clearance factor)
- P_{dis} : 토출 압력
- P_{suc} : 흡입 압력
- γ : 등엔트로피 지수
- v_{suc} : 흡입 시 냉매 비체적

인자 추정절차 (parameter estimation procedure)는 그림 4의 입출력 변수 관계로 정리할 수 있다. 압축기 제품 카탈로그에서 얻을 수 있는 데이터를 근거로 인자들을 추정하게 되는데 입력 변수들에는 다음과 같은 항목들이 포함된다.

피스톤 행정체적 PD , 간극인자 C , 압축기 흡배기 밸브에 걸친 압력강하 ΔP , 이론적 동력에 비례하는 것으로 가정되는 기전손실 (electromechanical losses) 정의에 사용되는 손실인자 η ,



[그림 3] 왕복형 압축기 PV 선도

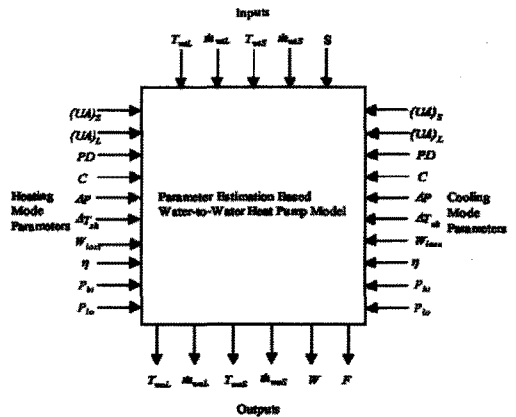
과열도 ΔT_{sh} , 기전손실의 상수항 W_{loss} , 공급측 열전달 계수 $(UA)_s$, 부하측 열전달 계수 $(UA)_L$

그림 4에서 T_{WIL} 는 유입수 부하측 온도, T_{WIS} 는 유입수 공급측 온도, m_{WIL} 는 유입수 부하측 질량 유량, m_{WIS} 는 유입수 공급측 질량 유량, S 는 Thermostatic signal를 나타낸다.

인자 추정법은 모델의 출력과 카타로그 상의 출력 간의 차이를 계산하는 목적함수를 포함한다. 목적함수는 다변수 불구속 다모드 (multi modal) Nelder Mead 최적화 알고리즘을 사용하여 그 차이를 최소화한다. 반복 계산에 의해 목적함수 결과값이 작아짐에 따라 모델 출력은 카탈로그 출력에 근접하게 되고 그 결과 의도하는 올바른 인자 추정값이 산출된다. 인자추정 알고리즘의 구체적인 플로우 차트는 그림 5와 같다. 추정하고자 하는 인자들에 대하여 최소화될 오차 합인 자승 (SSQE; the square of the sum of the errors)은 다음과 같다.

$$SSQE = \sum_{i=1} \left(\frac{(W_{cat}) - (W)_i}{(W_{cat})} \right)^2 + \left(\frac{(QL_{cat}) - (QL)_i}{(QL_{cat})} \right) \quad (4)$$

여기서 W_{cat} 는 카타로그 소비 동력, W 는 모델 소비 동력, QL_{cat} 는 카타로그 부하측 열전달, QL 은 모델 부하측 열전달을 나타낸다. 표 1은 이번 시뮬레이션에 적용될 열펌프 재원을 나타낸다.



[그림 4] 물-대-물 열펌프 인자 추정법 계산을 위한 플로우 차트

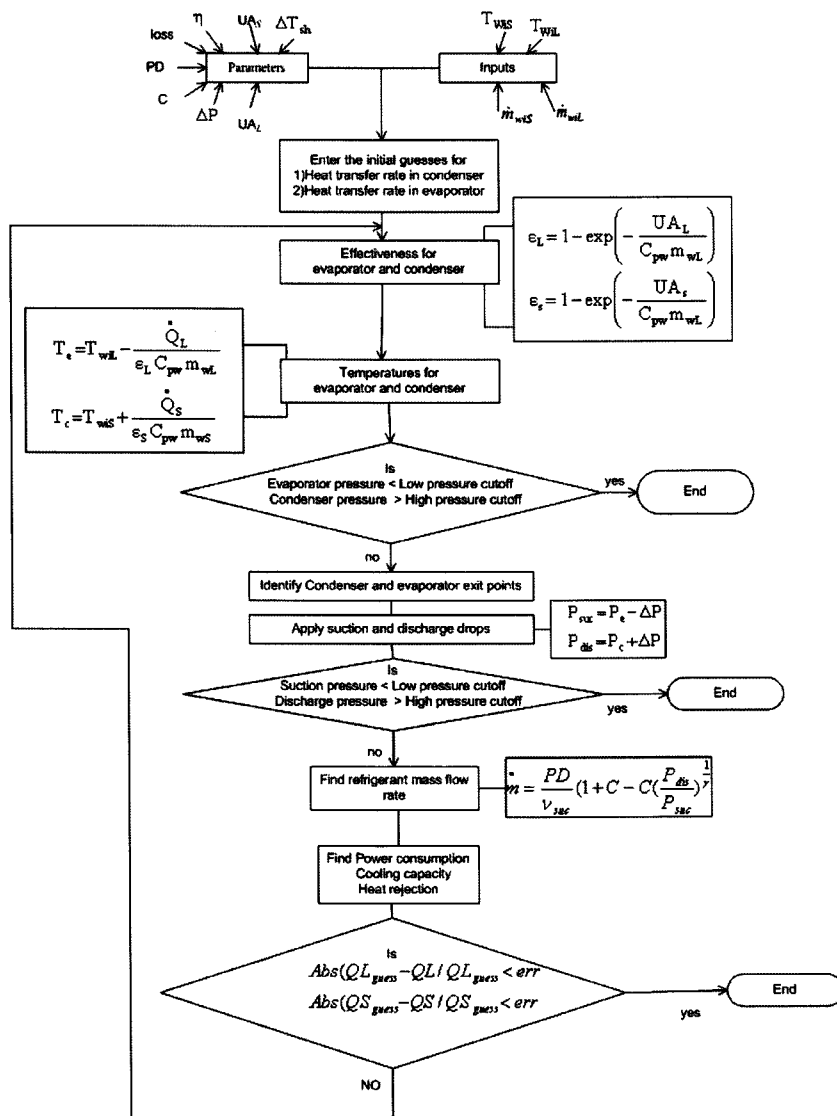
3.2 지중 열교환기 모델

이 모델은 A. Murugappan의 석사논문^[3]으로부터 유도된 것이다. Eskilson(1987)^[4], Yavuzturk and Spitler (1999)^[5]는 각각 장기 및 단기 응답 인자를 개발하였는데 이 인자들은 보어홀 (borehole) 온도 응답을 정하는데 사용된다. 응답인자는 이산 시간간격으로 어떤 변수의 현재 값을 다른 기타변수들의 과거 값에 연계시키는

무한급수이다. 이 응답 인자를 g-함수라고 한다. 여기에서 언급하는 가변 시간 간격 모델(variable time-step model)은 장단기 g-함수들을 이용하여 부하의 단기 변동에 대한 보어홀 응답을 예측하는 것이다.

3.2.1 장기 시간간격 응답인자

Eskilson은 다양한 보어홀 배열에 대한 g-함수



[그림 5] 인자추정법에 의한 물대물 열펌프 모델의 미지 인자 추정 알고리즘

<표 1> ZeSH-II의 건축개요

Input parameters	Cooling	Heating
Nominal COP	3.5	←
Nominal Capacity [W]	45,000	50,000
Minimum Part Load Ratio	0.0	←
Maximum Part Load Ratio	1	←
Optimum Part Load Ratio	1	←
Load Side Flow Rate [m³/s]	0.003	←
Source Side Flow Rate [m³/s]	0.003	←
Load Side Heat Transfer Coefficient [W/K]	7761	←
Source Side Heat Transfer Coefficient [W/K]	3998	←
Piston Displacement [m³/s]	0.012544	←
Compressor Clearance Factor	0.05469	←
Compressor Suction and Discharge Pressure Drop [Pa]	92156.2	←
Superheating [°C]	4.8907	←
Constant Part of Electromechanical Power Losses [W]	2803.9	←
Loss Factor	0.699	←
High Pressure Cut Off [Pa]	0.0	←
Low Pressure Cut Off [Pa]	0.0	←
Cycle Time [hr]	0.15	←

를 개발하였다. 그는 다양한 보어홀 길이에 대한 보어홀 간격 B/H , 대개 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3 및 ∞ (여기서 ∞ 는 단일 홀을 의미한다.)에 대하여 g -함수 그래프를 그렸다.

그림 6은 단일 보어홀 별로 B/H 가 0.1인 간격을 갖는 수직 보어홀의 배열에 대하여 $\ln(t/t_s)$ 로 정의되는 무차원 시간 (여기서 $t_s = H^2/9\alpha$)에 대한 g 함수 그래프를 나타낸다. g 함수는 Eskilson이 개발하였으며 그가 산정한 $5r_b^2/\alpha$ (여기서 r_b 는 보어홀 직경) 시간 경과 후에만 유효하다. 이 시간은 보어홀 배열에 따라 3~6 시간 정도로 변화된다. g 함수는 다음과 같다.

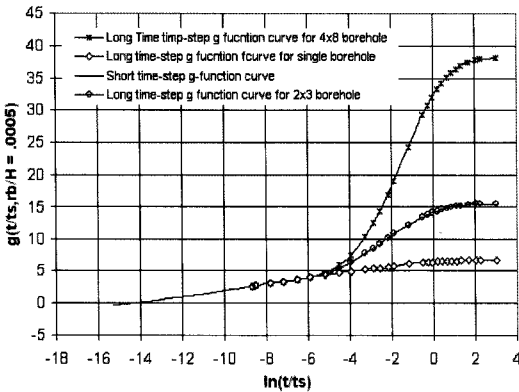
$$g(Fo, r_H^*) = \frac{1}{2} \int_0^{\left\{ \frac{\operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{r_H^{*2} + [0.5 - (z/H)]^2}}{2\sqrt{Fo}} \right]}{\sqrt{r_H^{*2} - [0.5 - (z/H)]^2}} \right\}} \left\{ \frac{\operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{r_H^{*2} + [0.5 + (z/H)]^2}}{2\sqrt{Fo}} \right]}{\sqrt{r_H^{*2} + [0.5 + (z/H)]^2}} \right\} d\left[\frac{z}{H}\right] \quad (5)$$

이는 그의 모델이 근거한 해석적 라인소스 모델 (analytical line source model)이 $r = r_b$ 인 보어

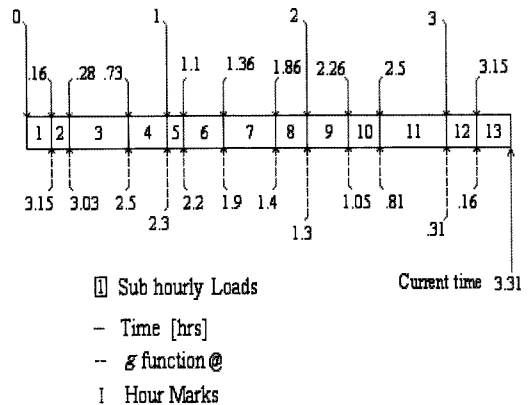
홀 벽면온도의 즉각적인 증가를 반영할 수 없기 때문이다. 이 모델은 무차원 시간 at/r_b^2 이 5 이상 이 된 후에야 수용할 만한 결과를 제시한다. 따라서 보어홀의 단기 응답을 모델링하기 위해서는 수 분 단위까지 정확한 결과를 예측할 수 있는 응답인자를 필요로 한다.

3.2.2 단기 시간간격 응답인자

Yavuzturk and Sittler (1999)^[5]는 극좌표 상에서 2차원 implicit 유한체적 모델을 이용하여 단기 시간응답 인자를 개발하였다. 지중열교환기의 원형 U-튜브 배관은 등가 원주길이를 갖는 pie sector로 근사된다. U-튜브 축방향으로의 일정한 열유속, 원주방향의 단열, 반경방향으로는 원거리에서의 일정한 온도 (constant far field temperature)는 3개의 경계조건이 되고 초기 조건으로는 undisturbed far field temperature를 가정한다. 수치해석 모델은 개별 보어홀 구성요소들에 기인한 열저항을 반영한다. 예컨대 파이프와 그라우트 (grout) 재질의 열저항, 파이프 내 유체의 대류 열저항. 앞서 언급한 장기 시간간격 g 함



[그림 6] 다양한 보어홀 배열에 대한 장기 시간간격 g 함수 그래프를 확장한 단기 시간간격 g 함수 그래프



[그림 7] 가변 time step g 함수 중첩 개념

수는 이러한 효과를 반영하지 않는다.

단기 시간 간격 g 함수는 서로 다른 보어홀 배열에 대해서도 동일하다. 이는 단기 g 함수가 적용되는 200 시간 미만의 기간에 대해서는 보어홀 간의 열적 간섭을 사실상 무시할 수 있기 때문이다. 따라서 단기 g 함수는 2.5분 간격부터 200 시간까지 적용하고 장기 시간간격 g 함수는 200 시간 이상에 대하여 적용할 것이 권고된다. 임의 시간에 대한 g 함수는 근접한 두 개의 알려진 값 사이에서 선형 내삽법으로 계산한다.

3.2.3 가변 시간간격 응답인자

가변 시간간격 모델은 Yavuzturk and Sittler (1999)^[6]이 개발한 단기 시간간격 모델을 확장하여 얻어졌다.

가변 시간간격 모델은 시뮬레이션이 진행 중인 그림 7을 통해 설명될 수 있다. 박스 안의 숫자는 시(hour) 미만의 부하를 나타낸다. 부하가 발생한 시 단위로 표현된 시각은 각 박스 위의 긴 실선 화살표로 표기된다. 가장 오른쪽의 실선 화살표는 현재의 시뮬레이션 시각인 3.31 hr를 나타낸다. 박스 아래에 주어진 점선 화살표로 표기된 시각은 현재 시점에 대하여 sub-hourly 부하가 각각 적용된 시각을 나타낸다. 예컨대, 시간미만 부하

1, 2 & 3을 고려해 보자. 이 부하들은 0 hrs, 0.16 hrs 및 0.28 hrs에 발생하였다. 현재 시점에서 보어홀 온도 응답은 3.15 hr, 3.03 hr 및 2.5 hr에 각각 g 함수를 적용하여 계산된다. 따라서 현재의 보어홀 온도를 계산하기 위해 시간미만 부하들 1-12를 점선으로 표기된 시각에서 해당되는 g 함수를 이용하여 중첩한다. 이렇게 하여 3.31 시각에서의 보어홀 온도가 계산된다. 그러나, 이전 시간 step 인 3.15 hr에 대해서는 부하 1, 2 및 3에 대한 시각은 2.99 hrs, 2.87 hrs 및 2.42 hrs 이 되며 전반적인 응답은 부하 1-11을 중첩하여 계산된다.

따라서 time step 증분이 일정하지 않으므로 각 time step 마다 해당 time step에서 발생한 시뮬레이션 시각을 저장하고 해당하는 g 함수를 계산할 필요가 있다. Yavuzturk model은 교란되지 않은 주변 지층온도를 초기조건으로 하여 반복 계산에 의해 열교환기 출구온도를 계산하는데 이는 이미 복잡한 알고리즘에 의해 소요된 계산시간을 더 길게 한다. 이 점을 극복하기 위해 출구 유체온도를 추산하는 일련의 명시적 방정식들이 유도되었다.

임의 time step에서의 보어홀 온도는 월간, 시간 및 시간미만 부하를 각 time step 별로 중첩하여

<표 2> 지중열교환기 모델 제원

Parameter	Value	Parameter	Value
Maximum Flow Rate [m³/s]	0.0033	Grout Thermal Conductivity [W/m-K]	0.692626
Number of Bore Holes	120	Pipe Thermal Conductivity [W/m-K]	0.391312
Bore Hole Length [m]	76.2	Fluid Thermal Conductivity [W/m-K]	0.602636
Bore Hole Radius [m]	0.063508	Fluid Density [kg/m³]	9.98200E+02
Ground Thermal Conductivity [W/m-K]	0.692626	Fluid Viscosity [N-s/m²]	9.87958E-04
Ground Thermal Heat Capacity [J/m³-K]	0.234700E7	Pipe Out Diameter [m]	2.66667E-02
Fluid Specific Heat [J/kg-K]	0.418211E4	U-Tube Distance [m]	2.53977E-02
Ground Temperature [°C]	13.375	Pipe Thickness [m]	2.41285E-03
Design Flow Rate [m³/s]	0.0033	G-Function Reference Ratio	0.0005

계산한다. 이해를 돕기 위해 2,193.733 hr에서의 보어홀 온도를 계산한다고 가정하자. 이 경우 월간 시간 블록은 730 hr이다. 3개월 총합 부하 블록은 각각 730 hrs, 1,460 hrs, 1,460 hrs 그리고 2,190 hrs에 대해서 존재하며, 시간부하는 2,191 시부터 2,193시까지이다. 나머지 0.733 시간에 대해서는 시간미만 부하계산에서 행해진다. 장기 시간 g 함수를 이용하여 중첩하면 3개월 총합 부하 블록에 대하여 2,190시에서의 보어홀 온도가 계산된다. 그리고 2,191부터 2,193시간 까지 시간부하는 상응하는 단기 시간간격 g 함수를 이용하여 중첩계산으로 2,193시간째 보어홀 온도가 얻어진다. 마지막으로 0.733 hr에 대한 단기 시간간격 g 함수를 계산하고 이전 값에 중첩하여 현재의 보어홀 온도가 계산된다. 지금까지 설

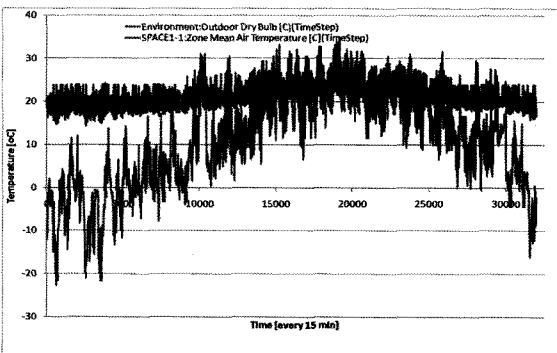
명한 내용을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_{2,193.733} = & T_{ground} + \sum_{m=1}^3 \left[\frac{\hat{q}_m - \hat{q}_{m-1}}{2\pi k_{ground}} g \left(\frac{t_{2,193.733} - t_{730(m-1)}, r_b}{t_s, H} \right) \right] \\
 & + \sum_{n=2190}^{2193} \left[\frac{\bar{q}_n - \bar{q}_{n-1}}{2\pi k_{ground}} g \left(\frac{t_{2,193.733} - t_{n-1}, r_b}{t_s, H} \right) \right] \\
 & + \sum_{p=2193}^{2193.733} \left[\frac{q_p - q_{p-1}}{2\pi k_{ground}} g \left(\frac{t_{2,193.733} - t_p, r_b}{t_s, H} \right) \right] \quad (6)
 \end{aligned}$$

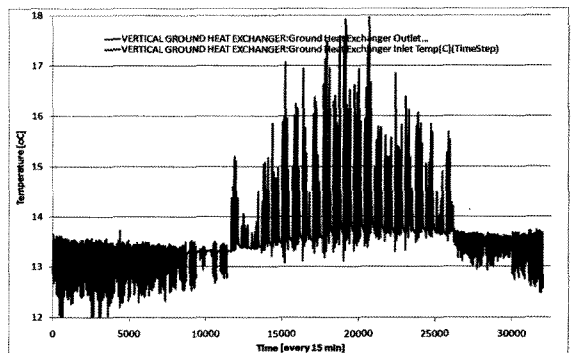
여기서

\hat{q} : 월간 평균 부하, \bar{q} : 시간 평균 부하, q : 시간미만 부하, m : 월간 총합 블록 지수, n : 시간총합 블록 지수, p : 시간미만 배열 지수, t_p : 과거 기간에 걸친 sub-hourly time steps

3.2.4 본 연구에 적용된 지중열교환기 모델 제원 모델링에 적용된 지중 열교환기 제원은 표 2와 같다.



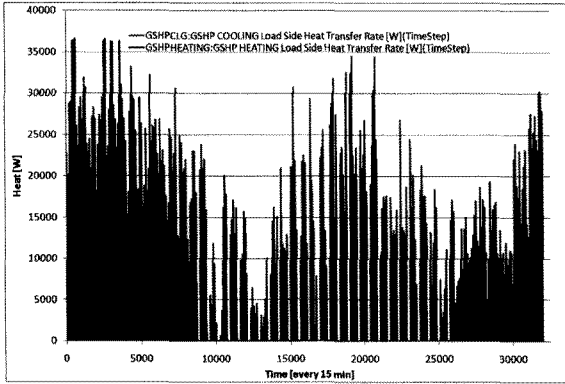
[그림 8] 연간 외기온도와 실내 온도



[그림 9] 지중열교환기 유체 입출구온도

4. 시뮬레이션 결과

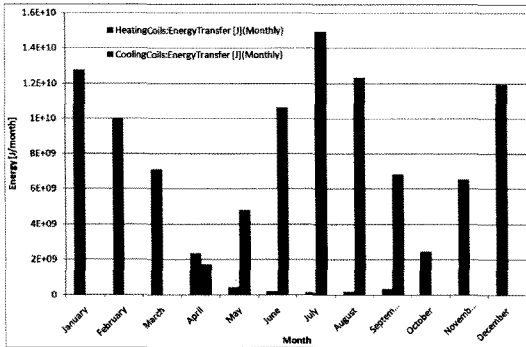
그림 8은 시카고 지역의 일년간 외기온도 및 Space 1-1 실내온도를 15분 간격으로 표시한



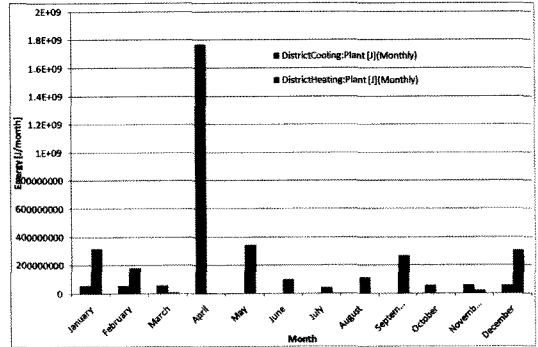
[그림 10] 연간 열펌프 소비 전력

것이다. 그림 9는 지열 시스템 운전에 따른 지중 열교환기 입구와 출구에서의 작동 유체 온도를 나타낸다. 그림 10은 열펌프 시스템 소비전력을 나타내며 여름과 겨울에 전력수요가 피크를 이룸을 알 수 있다. 또한 난방 피크부하는 37 kW, 냉방 피크부하는 35 kW로서는 열펌프의 난방 및 냉방 용량의 74%, 78%이다.

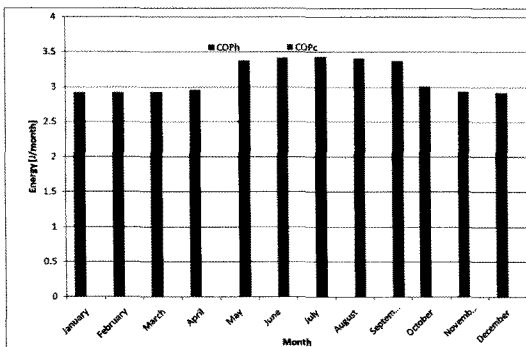
그림 11~14는 15분 간격으로 시뮬레이션 된 결과를 월간으로 적분하여 얻어진 결과를 나타낸 것이다. 그림 11은 AHU의 냉방 및 난방 코일에서 소비된 월간 에너지를 나타내고 그림 12는 소비된 지역 냉난방 에너지량이다. 부하가 작은 봄, 가을에는 열펌프 작동이 비경제적일 수 있고, 여름철 냉방 중 온도 조절을 위해 소량의 난방에너지가 필요한 경우에는 열펌프에서 난방에너지를 공급할 수 없으므로 지역난방 열을 활용해야 한



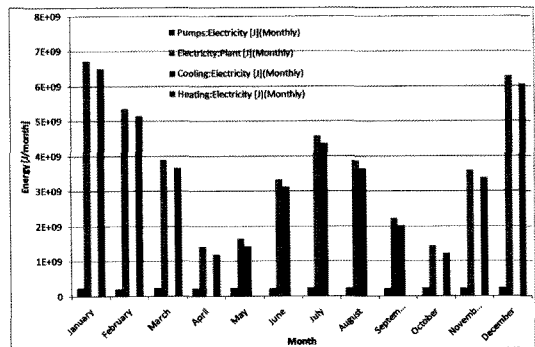
[그림 11] 월간 냉난방 에너지 소비량



[그림 12] 월간 지역냉난방 에너지 소비량



[그림 13] 열펌프 월간 COP



[그림 14] 월간 지열시스템 전력 소비량

다. 그러한 월간 에너지 소비량이 그림 12와 같다. 비록 소량이기는 하나 쾌적한 냉난방을 위해 보조열원으로서 지역 냉난방 열원이 필요함을 알 수 있다.

그림 13은 월간 열펌프 COP를 나타낸다. 응축부와 증발부 온도에 따라 COP가 영향을 많이 받는데 연간 온도가 비교적 일정한 지열을 사용하는 결과 COP가 비교적 일정하게 높은 값을 유지함을 알 수 있다. 그림 14는 열펌프와 작동유체(냉수, 온수 및 냉각수) 펌프 동력을 포함한 전력 소비를 나타낸다. 그래프에서 알 수 있듯이 펌프 동력이 차지하는 비중은 매우 작다.

5. 결론

지열 열펌프 및 지중 열교환기 설계는 건물 부하 및 외기온도와 밀접한 관계가 있다. 또한 열펌프 COP는 작동유체의 온도와의 밀접하게 연계되어 있으므로 외기, 건물, 지열의 동적 거동이 모사되어야 한다. 그러한 면에서 EnergyPlus는 최소 15분 time step으로 모사가 가능하여 열펌프 및 지중 열교환기 설계 타당성을 평가할 수 있는 최신의 합리적 틀이라고 판단된다.

참고문헌

1. Department of energy, 2011, EnergyPlus Energy Simulation Software, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

2. Jin, Hui, 2002, Parameter Estimation Based Models of Water Source Heat Pumps, Phd. Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University. (downloadable from <http://www.hvac.okstate.edu/>)

3. Murugappan, Arun, 2002, Implementing Ground Source Heat Pump and Ground Loop Heat Exchanger Models in the Energy-Plus Simulation Environment, M.S. Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University (downloadable from <http://www.hvac.okstate.edu/>)

4. Eskilson, P., 1987, Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Ph.D. Thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Lund, Sweden.

5. Yavuzturk, C., J.D. Spitler, 1999, A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchangers, ASHRAE Transactions, 105(2):475-485.

6. Yavuzturk, C., 1999, Modeling of Vertical Ground Loop Heat Exchangers for Ground Source Heat Pump Systems, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.