



## 지역 기후 특성에 따른 지열시스템의 도입경제성 차이에 관한 연구

### *Feasibility study of ground source heat pump system according to the local climate condition*

남유진\*

Nam, Yujin\*

\* Corresponding author, Depf. of Architecture Cheongju University, South Korea(namyujin@cju.ac.kr)

#### ABSTRACT

The ground source heat pump (GSHP) system is a kind of the temperature differential energy system using relatively stable underground temperature as heat source of space heating and cooling. This system can achieve higher performance of system than it of conventional air source heat pump systems. However, its superiority of the system performance is different according to installation location or local climate, because the system performance depends on the underground condition which is decided by annual average air temperature. In this study, in order to estimate the feasibility of the ground source heat pump system according to the local climate, numerical simulation was conducted using the ground heat transfer model and the surface heat balance model. The case study was conducted in the condition of Seoul, Daejeon, and Busan, In the result, the heat exchange rate of Busan was 34.33 W/m as the largest in heating season and it of Seoul was 40.61 W/m as the largest in cooling.

#### KEYWORD

지열 히트펌프 시스템,  
수치시뮬레이션,  
기후,  
열교환량

Ground heat pump system,  
Numerical Simulation,  
Climate,  
Heat Exchange Rate

#### ACCEPTANCE INFO

Received July 18, 2014  
Final revision received August 10, 2014  
Accepted August 12, 2014

© 2014 KIEAE Journal

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

최근, 건물에너지 절약 및 신재생에너지 이용에 대한 관심이 높아짐에 따라, 관련 산업 및 기술 개발이 활발하다. 정부도 이러한 시대적 요구에 따라 2004년 ‘신에너지 및 재생에너지 개발·이용·촉진법’을 시작으로 에너지 소비구조의 개선 및 에너지원의 다양화를 적극 추진하고 있다. 특히, 2016년 시행예정인 신재생에너지 의무화 제도(RHO, Renewable Heat Obligation)는 태양열, 지열, 바이오매스 등 열에너지 산업의 활성화를 가속화시킬 것으로 예상된다. 이 제도가 시행되면 1만<sup>2</sup>이상 신축 건축물의 일정 열에너지 사용량을 신재생에너지로 공급하도록 되어 있어 건축과 신재생에너지가 결합된 기술 개발이 더욱 활성화될 전망이다. 이들 신재생에너지 중 지열 이용 냉난방 시스템은 연중 일정한 온도를 유지하는 지중이나 지하수를 열원 매체로 하여 건물의 냉난방을 도모하는 고효율 기술로서 주목 받고 있다.

지열 시스템은 냉난방시 종래의 공기열원 이용 시스템에 비해 보다 효율적인 열원을 이용함으로써 시스템의 COP(Coefficient of Performance)를 향상시키는 온도차에너지 이용기술이다. 즉, 본 기술은 외기온과 온도차를 가지는 지반 및 지하수의 항온층만 존재한다

면 어디서든 이용할 수 있는 기술이다. 하지만, 본 기술의 시스템 성능은 지반 및 지하수 조건이나 지중열교환기 설계사양 등에 크게 의존하므로 모든 지역이나 지반 조건에서 높은 에너지 절감 효율을 얻을 수 있는 것은 아니다. 일반적으로 지열 시스템은 공기열원 시스템에 비해 높은 COP를 가질 수 있으나, 지열열교환기 설치를 위한 초기 비용의 부담으로 보급 확산에 어려움이 있다. 따라서, 경제적인 관점에서 지열 이용 시스템이 효과적인지에 대한 결정은 기존 공기열원 시스템에 비해 얼마나 성능의 비교우위가 있는지에 따라 달라지며, 그것은 그 지역에 지반 조건이나 기후에 큰 영향을 받는다고 할 수 있다. 즉, 지중 항온층과 열교환된 파이프 내 순환수가 지표면 부근에서 기후 조건에 따라 열손실이 발생할 수 있으며, 그러한 문제로 인해 전체적인 시스템 효율이 저하되는 현상이 발생할 수 있다.

지반 조건이나 기후에 따른 지열 시스템의 성능에 관한 연구는 S.P.Kavanaugh의 지열 시스템의 설계 기술 정립에서도 기술되고 있으며, 국내외 다수의 연구자들에 의해 실험 및 시뮬레이션을 이용한 접근들이 이루어지고 있다.

C.O. Popiel et al.<sup>1)</sup>은 10년간 Poznan City의 노지와 잔디지역의 기후와 지질특성을 고려한 지중온도를 측정하여 식물로 덮여져 있는 선정지가 냉·난방 열원으로 이용하기 더 적합함을 확인하였고, Hiep V. Nguyen et al.<sup>2)</sup>은 북미 지역의 기후 변화에 따른 건물의 용도별 지열 시스템의 전기요금 회수기간을 분석, 따뜻한 지역이 요금 회수에 용이함을 확인하였다. 또한, Omer Ozyurt et al.<sup>3)</sup>은 실험을 통하여 터

키의 추운 기후조건에서의 히트펌프 성능 평가를 실시하여 고효율을 얻기 위한 설계변수에 관하여 고찰하였다. 국내에서도 김승욱 등<sup>4)</sup>은 우리나라의 기후조건을 분석하여 습윤 해와 건조 해로 나누어 지중 온도의 변동 특성에 대하여 분석하였고, 구민호 등<sup>5)</sup>은 약 20년간의 우리나라 58개 기상관측소의 자료를 분석하여 각 지역의 지표온도 변동 요인을 분석, 이에 대한 정성적, 정량적 분석 결과를 제시하였다. 또한, 오진환 등<sup>6)</sup>은 시뮬레이션을 통한 기후, 토양 열전도율, 지중 온도를 고려한 지중 채열량 분석을 실시하였다. 하지만, 지열시스템의 최적설계를 위한 많은 연구들이 진행되고 있으나, 각 지역별 기후 조건을 고려한 해석적 연구는 드물다. 한편, 지중 채열량을 정확하게 해석하기 위해서는 지중내 열이동 및 지하수 이동을 동시에 계산함과 동시에 지표면으로부터의 열플럭스에 대한 영향을 해당 지역의 기후에 대응하여 해석하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 지하수-지중열 이동 동시해석 모델에 근거한 지중 채열량 예측 시뮬레이션을 실시하여 도입지의 기후 조건 변화에 따른 지중 채열량 및 지중 온도 변화를 검토하였다.

지열 시스템은 온도차에너지 이용 기술의 하나로서 타 시스템에 비해 유리한 열원을 이용하여 효율성 및 경제적 효과를 얻을 수 있는 기술이다. 지열 시스템의 설치조건이 같고 초기 설치 비용이 같다면, 시스템의 효율은 결국 각 지역에 대한 경제성을 대변할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 도입경제성을 각 지역의 지열히트펌프시스템 도입시의 히트펌프 효율로 나타내었다. 또한, 본 해석 결과를 통해 시스템 도입지의 기후조건과 지중 채열량의 상관관계를 분석하고, 용량 설정에 있어서의 기초자료로서 활용하고자 한다.

## 2. 지중 채열량 해석

### 2.1. 시뮬레이션 개요

본 논문에서는 지역별 기후 조건에 따른 지표면 부근의 지중 온도 변화를 정확하게 해석하기 위해, 지표면 열이동 모델과 지중 채열량 예측 모델을 연성한 정밀 시뮬레이션을 실시하였다. 지표면 열이동 모델은 각 지역의 기상조건에 대해, 태양복사, 지표면복사, 대류열전달, 현열 및 잠열 이동을 고려하여 총량을 산출하고 이를 지표면 경계 조건으로 설정하는 방식으로 계산하였다. 한편, 지중 채열량 예측은 유한요소법(FEM, Finite Element Model)에 근거한 해석 코드 FEFLOW를 이용하였다.

지중내 열이동 및 지하수 이동은 토양내 고체, 액수, 기체 3상에 대해 각각 질량보존 및 운동량 보존, 에너지 보존 방정식을 만족하는 것으로 구성되었다. 또한, 지중으로부터의 채열량을 정확하게 예측하기 위해 지중 열교환기 내 순환수 모델을 이용하여 열교환기 내 순환수와 파이프 내벽간의 대류열전달 및 파이프와 그라우트 및 토양과의 열전도를 해석하였다.

세부 해석 방정식에 대해서는 저자의 선행연구에서 설명이 되어 본 논문에서는 생략한다. 한편, Fig.1은 본 연구에서 수행된 시뮬레이션의 개요를 나타낸다. 본 시스템은 건물의 냉난방을 위한 지열원 히트펌프와 지중열교환 파이프, 순환펌프로 구성되어 있고, 본 연구에서는 지중열교환기에서 나오는 출구온도를 정확하게 예측하는 시뮬

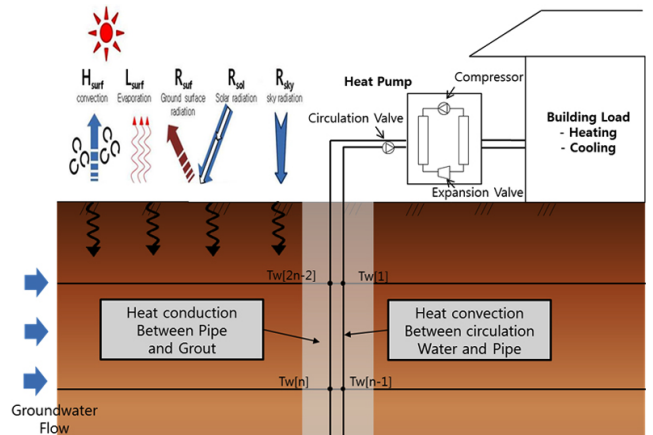


Fig. 1. General heat exchanger

레이션을 수행한다. 이 때, 각 깊이의 순환수 온도는 해석 모델을 이용하여 계산된다.

### 2.2. 해석 모델의 개요

Fig.2는 본 연구에서 채열량 예측에 이용된 해석 모델을 나타낸다. 해석모델은 지중열교환기의 형상을 정확하게 설정하기 위해 Tetra메쉬로 형상화하였고, 지중 열이동의 영향범위 등을 고려하여 40 m × 40 m × 100 m의 직육면체 형상의 Domain을 구축하였다. 한편, 지중 열교환기는 직경 0.2 m의 보어홀 내부에 Single U-tube 32A (내경 26 mm, 외경 32 mm)가 설치되어 있는 것으로 가정하여 메쉬생성을 실시하였다. 해석 모델 상부는 실시간으로 계산되는 지표면 열플럭스를 입력하고 측면 및 하부는 단일 조건으로 해석모델을 구축하였다.

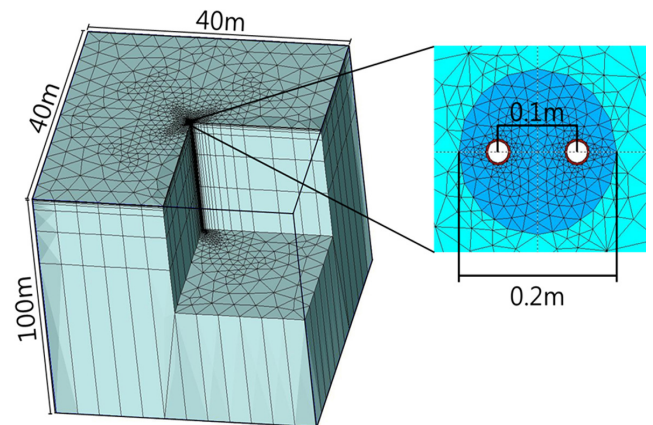


Fig. 2. Simulation Model

### 2.3. 해석 조건

본 연구에서는 먼저, 지중 채열량 예측 시뮬레이션을 통해 서울, 대전, 부산 3개 지역의 기후 조건에 따른 채열량 분석을 실시하였다. 해석수법 및 토양 열물성치 추정방법에 관해서는 선행연구<sup>7)</sup>에서 개발된 방법을 참고로 하여 실행하였으며, 각 도시의 기후 조건은 과거 10년치의 평균인 표준기상데이터를 이용하였다. 또한, 지중온도는 J. Lee et.al.<sup>8)</sup>의 선행연구를 참고하여 해당 지역의 천부 지하수 온도

를 초기 지중 온도로 가정하고 입력하였다. Fig. 3~5는 각 도시별 기온 변화로서, 하계 및 동계 일평균기온과 연간 월평균 기온을 각각 나타낸다. 여름철의 월평균온도는 각 지역의 편차가 크지 않으나, 겨울철에는 위도에 따라 서울, 대전, 부산 순으로 낮은 것을 확인할 수 있다. 이것은 하계 냉방 조건보다는 동계 난방 조건에서 지중 채열량의 차이가 더 크게 나타날 수 있다는 것을 시사하고, 본 연구에서는 그 정량적 차이를 분석하기 위해 수치 해석을 실시하였다.

토양 조건은 화강암(공극률 0.1, 열전도율 3.5 W/mK)으로 설정하였고, 보어홀은 콘크리트(공극률 0.001, 열전도율 1.5 W/mK)로 그라우트한 것으로 가정하였다. 한편, 지중 열교환 파이프는 일반적으로 통용되는 HDPE의 재질을 고려하여 열전도율 0.41 W/mK으로 설정하였다.

한편, Table. 1은 시뮬레이션 조건 및 운전 스케줄을 나타낸다. 지

Table. 1 Simulation conditions

Calculation Tool	FEFLOW + User subroutine
Location	Seoul, Daejeon, Busan
Ground Heat Exchanger(GHE)	Single U-tube 32 A Bore Hole Concrete Grouting
Operation Condition	Initial $\Delta T$ 10°C Limitation Temp. 5°C
Domain	40m × 40m × 100m
Operation	Cooling : 6/1 ~ 8/31. 3 months Heating: 12/1 ~ 2/28. 3 months 09:00 ~ 18:00
Soil Condition	Granite ( $\lambda$ : 3.5 W/mK) Initial Temp. 16°C
Flow rate	9.3 L/min

중 열원의 온도가 외기온보다 낮아지면, 지열 설비가 공기열원 설비에 비해 상대적 우위성을 가질 수가 없다. 따라서, 지중 채열량을 산출하기 위해서는 지중열원의 온도가 일정 온도 이상을 유지해야 할 것이다.

그 제한 온도 내에서 지중에서 채열할 수 있는 최대 채열량을 산출하기 위해, 채열시의 순환수 출입구 온도차를 조정하여 파이프 내 순환수 온도를 5°C 이상으로 유지하였다. 즉, 초기 순환수 출입구 온도차는 10°C로 하, 10°C가 확보되지 않을 시 점점 줄여가는 방법으로 각 케이스의 최대 채열량을 산출하였다. 한편, 파이프 내 순환수의 유속은 0.292 m/s로 가정하였다. 운전 스케줄은 오피스 빌딩의 운전을 가정하여 오전 9시부터 오후 6시까지의 운전으로 하였고, 하계 및 동계 각각 3개월간의 운전을 실시하여 순환수 온도 및 채열량을 각각 계산하였다.

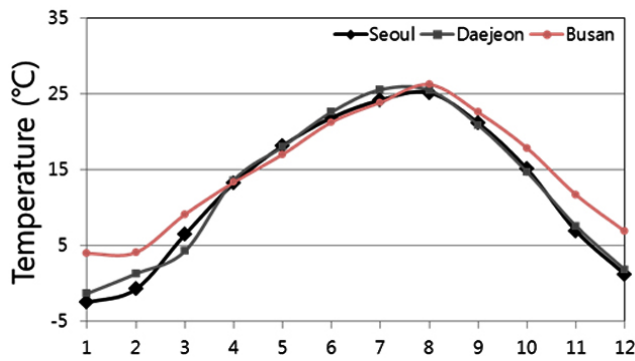


Fig. 3. Local Weather Condition

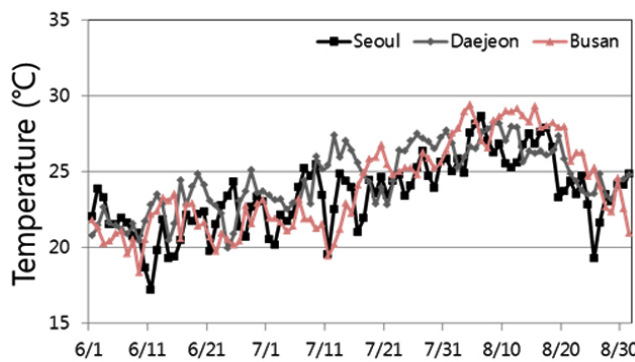


Fig. 4. Fluctuation of air temperature in cooling season

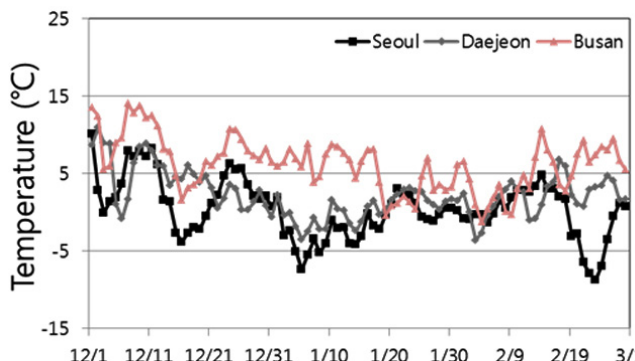


Fig. 5. Fluctuation of air temperature in heating season

### 3. 지중 채열량 해석 결과

#### 3.1. 지중 채열량 산출

지중 채열량(Heat Exchange Rate, HER)은 지중열교환기 단위 깊이 당 열교환량  $Q[W/m]$ 으로 나타내며, 아래와 같은 식에 의해서 산출하였다. 여기서,  $C$ 는 순환수의 비열 $[J/kg\cdot^{\circ}C]$ ,  $m$ 은 유량 $[kg/h]$ ,  $\Delta T$ 는 순환수 출입구 온도차 $[^{\circ}C]$ ,  $L$ 은 지중열교환기의 깊이 $[m]$ 를 나타낸다.

$$Q[W/m] = \frac{C \times m \times \Delta T}{L} \times 1000 \div 3600$$

Fig. 6은 서울을 대상으로 실시한 시뮬레이션 결과로서, H.P → Ground는 히트펌프에서 지중으로 가는 순환수 온도를 나타내고, Ground → H.P는 지중에서 히트펌프로 들어오는 순환수 온도를 나타낸다. 운전 초기에는 지중온도가 안정된 상태를 유지하고 있어 비교적 큰 출입구 온도차( $\Delta T$ )를 얻을 수 있으나, 운전 개시 후 지중 채열로 인한 지중온도 하강으로 인해  $\Delta T$ 가 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이 온도차는 운전이 종료되는 3개월간 서서히 줄어들어 난방 기간 평균 온도차는 4.24°C로 계산되었다. Fig. 7은 3개월간의 지중 채열량 변화를 나타낸 결과로서 순환수의 출입구 온도차에 비례해서 운전 초기부터 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 계산 결과, 서울

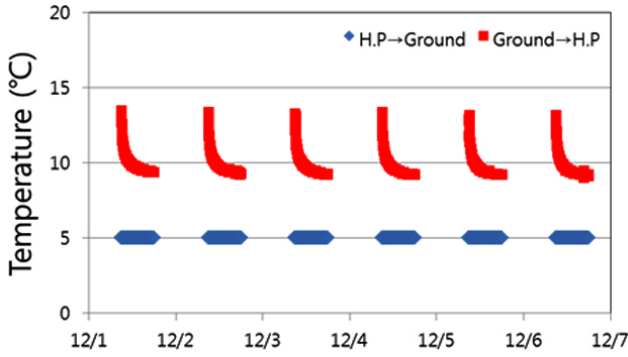


Fig. 6. Fluctuation of Heat Source Temperature in Heating (Seoul)

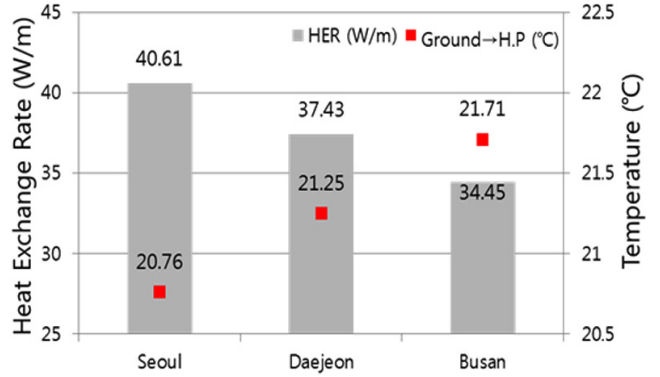


Fig. 9. Heat Exchange Rate and Heat Source Temperature in cooling

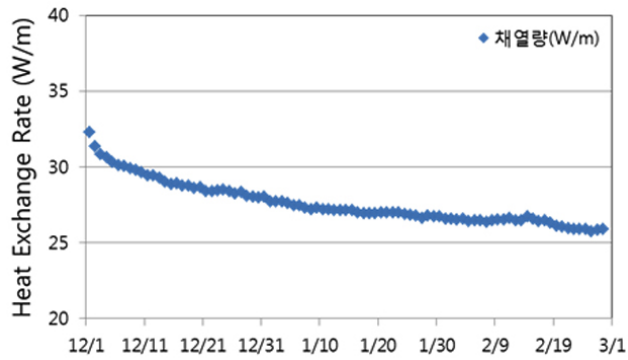


Fig. 7. Heat Exchange Rate in Heating Season (Seoul)

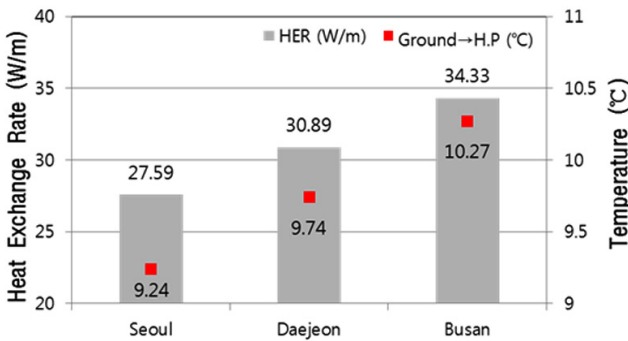


Fig. 8. Heat Exchange Rate and Heat Source Temperature in Heating

지역의 기간 평균 채열량은 동계 27.59 W/m로 나타났다.

Fig. 8과 9는 전 케이스의 결과를 종합한 것으로서, 히트펌프의 열원온도가 되는 지중열교환기 출구온도의 기간 평균과 지중 채열량 및 방열량을 각각 나타낸다. 동계 난방시의 채열량은 서울에서 27.59 W/m, 대전에서 30.89 W/m, 부산에서 34.33 W/m로 나타나, 남쪽 지역일수록 평균 기온 및 지중온도가 높아 동계 채열 가능량이 큰 것으로 나타났다. 서울과 부산의 평균 채열량 차이는 약 24%로 계산되었다. 또한, 지중열교환기로부터 나오는 출구온도의 기간 평균도 서울 9.24°C, 대전 9.74°C, 부산 10.27°C로 나타나 남쪽으로 갈수록 더 유리한 난방 열원을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

한편, Fig 9의 하계 냉방시 방열량 및 지중열교환기 출구온도의 기간 평균을 나타낸다. 냉방시의 방열량은 서울에서 가장 높았으며, 부산에 비해 18% 많은 방열이 가능한 것으로 계산되었다. 또한, 냉방시, 지중열교환기 출구온도의 기간평균은 서울 20.76°C, 대전 21.2

Table 2. Simulation Results

	Ta (°C)	Rs (W/m <sup>2</sup> )	Tsoil (°C)	EWT (°C)		HER (W/m)	
				Sum.	Win.	Sum.	Win.
Seoul	12.57	53.41	14.0	20.76	9.24	40.61	27.59
Daejeon	12.91	65.40	15.0	21.25	9.74	37.43	30.89
Busan	14.87	66.19	16.0	21.71	10.27	34.45	34.33

5°C, 부산 21.71°C로 계산되어, 연평균 기온이 가장 낮은 서울이 가장 유리한 것으로 나타났다. Table 2는 시뮬레이션 결과를 종합하여 나타낸다. 여기서, Ta는 평균외기온, Rs는 평균일사량, Tsoil는 설정지중온도, EWT는 순환수의 평균출구온도 (Entering Water Temperature), HER은 평균 채열량을 나타낸다.

#### 4. 지역별 지열 히트펌프 성능 분석

##### 4.1. 히트펌프 성능분석 개요

본 연구에서는 각 지역의 지열 이용 시스템 적용시의 성능 비교 분석을 위해, 열원온도 변화에 따른 히트펌프의 성능 특성을 이용하여 각 조건의 히트펌프 성적계수 (Coefficient of Performance, COP) 산출을 실시하였다. 히트펌프 성능곡선은 10RT급 물-물 히트펌프의 성능곡선을 베이스로 하여 만들었으며, 선행연구 결과를 참고하였다. 2차측의 열원온도는 냉방시 7~12°C, 난방시 40~45°C로 가정하였고, 시뮬레이션에서 얻은 지중열원온도와 히트펌프 성능 특성 곡선을 이용하여 예상 성능을 비교 검토하였다. Fig.10은 히트펌프 카탈로그치를 참조한 냉난방 성능곡선을 나타낸다. 냉방시 열원온도가 낮을수록 히트펌프의 COP는 증가하고, 난방시는 그 반대가 되는 양상을 보여주고 있다.

##### 4.2. 히트펌프 성능분석 결과

Fig.11 및 Table. 3은 각 지역의 예상 히트펌프 성능을 비교 분석한 결과를 나타낸다. 히트펌프의 COP는 평균 열원온도의 영향을 받아, 냉방시 서울 7.38, 대전 7.25, 부산 7.14 순으로 나타나 서울과 부산의 차이가 3% 내외인 것으로 확인되었다. 한편, 난방시는 부산 4.34, 대전 4.29, 서울 4.24의 순으로 서울에 비해 부산이 2.3% 높은 것으로 나타났다.

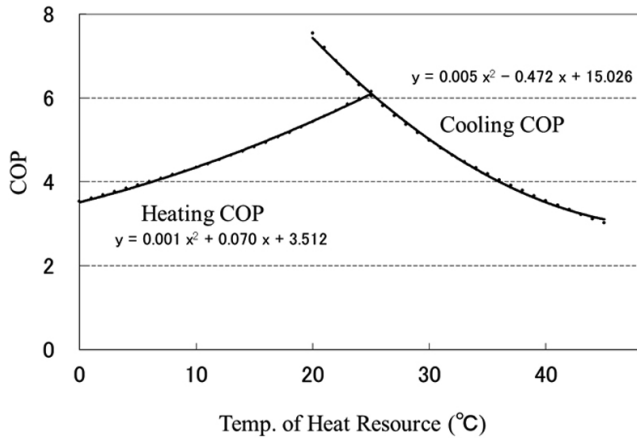


Fig. 10. Heat Pump Performance Curve

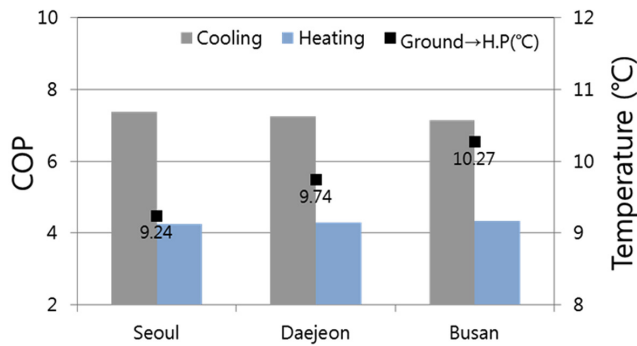


Fig. 11. Heat Pump COP of Heating and Cooling

Table 3. Calculation Result of Heat Pump COP

	Seoul	Daejeon	Busan
Cooling	7.38	7.25	7.14
Heating	4.24	4.29	4.34

지중 열원 온도에 따라, 냉방시는 위도가 높은 지역이 유리하고, 난방시는 위도가 낮은 지역의 히트펌프 성능이 우수한 것으로 나타났다. 그 차이는 2~3% 정도로서 미미한 것을 확인하였다. 이것은 지중 채열 및 방열을 제한 온도를 두고 실시한 결과로서, 지역에 따른 열원온도의 차이가 1°C 정도의 수준으로 계산되어 히트펌프의 성능 변화에도 그다지 큰 영향을 주지 않았던 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 지역의 기후 조건에 따른 지열 이용 시스템의 도입 경제성 분석을 위해, 서울, 대전, 부산을 대상으로 지중 채열량 및 지중 온도, 예상 히트펌프 COP 등을 검토하였다. 그 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지중 채열량은 난방시 연평균 기온이 높은 지역에서 더 많은 채열량을 얻을 수 있으나, 냉방시에는 연평균 기온이 낮은 지역에서 지중 방열량이 상대적으로 많은 것으로 나타났으며, 서울과 부산의 차

이는 난방시 18%, 냉방시 24%로 계산되었다. 이것은 지역에 따라 동일 부하조건이라도 지중열교환기 길이의 가감이 필요하다는 것을 시사한다.

(2) 각 지역의 열원온도 변화에 따른 히트펌프 성능 검토를 실시한 결과, 지역에 따라 약 2~3%의 차이는 있으나, 지역 조건이 지열 히트펌프의 성능에는 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.

향후, 보다 다양한 지역의 기후 조건에 대한 검토를 실시할 예정이며, 시공비 및 시공기간 등을 고려한 지열시스템의 최적설계법을 구축할 예정이다.

### Acknowledgement

이 논문은 2012-2014학년도에 청구대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

### References

- [1] C.O. Popiel, J. Wojtkowiak, Temperature distributions of ground in the urban region of Poznan City, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, pp.135-148
- [2] Hiep V. Nguyen, Ying Lam E. Law, Masih Alavy, Philip R. Walsh, Wey H. Leong, Seth B. Dworkin, An analysis of the factors affecting hybrid ground-source heat pump installation potential in North America, *Applied Energy*, 2014, pp.28-38
- [3] Omer Ozyurt, Dundar Arif Ekinci, Experimental study of vertical ground-source heat pump performance evaluation for cold climate in Turkey, *Applied Energy*, 2011, pp.1257-1265
- [4] Seung-Ok Kim, Myoung-Seok Suh and Chong-Heum Kwak, Climatological characteristics in the variation of soil temperature in Korea, *Jour. Korean Earth Science Society*, 2005, pp.93-105
- [5] Min-Ho Koo, Yoonho Song and Jun-Hak Lee, Analyzing spatial and temporal variation of ground surface temperature in Korea, *Economic and environmental geology*, 2006, pp.255-268
- [6] Oh Jin Hwan, Nam Yujin, Characteristics analysis of the heat exchange rate according to soil temperature and grout material using numerical simulation, *KIEAE Journal*, 2014, pp.27-34
- [7] Nam Y. J., Ooka R. and Hwang S. H., Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system, *Energy and Buildings*, 2007, Vol. 40, pp.2133-2140.
- [8] Jin-Yong Lee, Jeong-sng Hahn, Characterization of groundwater temperature obtained from the korean national groundwater monitoring stations: Implications for heat pumps, *Journal of Hydrology*, 2006, pp.514-526
- [9] Nam Yujin, Numerical analysis for the effect of ground and groundwater conditions on the performance of ground source heat pump system, *Journal of SAREK*, Vol. 23, No. 5, pp. 321-326
- [8] H. Yang, P. Cui, Z. Fang, Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems, *Applied Energy*, 2010, pp.16-27