

## 인공신경망 모델을 활용한 저심도 모듈러 지중열교환기의 난방성능 예측에 관한 연구

### Heating Performance Prediction of Low-depth Modular Ground Heat Exchanger based on Artificial Neural Network Model

오진환(Jinhwan Oh), 조정흙(Jeong-Heum Cho), 배상무(Sangmu Bae)\*, 채호병(Hobyung Chae)\*, 남유진(Yujin Nam)\*\*†

부산대학교 건축공학과 박사과정, \*부산대학교 생산기술연구소, \*\*부산대학교 건축공학과 교수  
*Ph.D Student, Department of Architecture Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea*  
*\*Postdoctoral Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University, Busan 46241, Korea*  
*\*\*Professor, Department of Architecture Engineering Pusan National University, Busan 46241, Korea*

#### Abstract

Ground source heat pump (GSHP) system is highly efficient and environment-friendly and supplies heating, cooling and hot water to buildings. For an optimal design of the GSHP system, the ground thermal properties should be determined to estimate the heat exchange rate between ground and borehole heat exchangers (BHE) and the system performance during long-term operating periods. However, the process increases the initial cost and construction period, which causes the system to be hindered in distribution. On the other hand, much research has been applied to the artificial neural network (ANN) to solve problems based on data efficiently and stably. This research proposes the predictive performance model utilizing ANN considering local characteristics and weather data for the predictive performance model. The ANN model predicts the entering water temperature (EWT) from the GHEs to the heat pump for the modular GHEs, which were developed to reduce the cost and spatial disadvantages of the vertical-type GHEs. As a result, the temperature error between the data and predicted results was 3.52%. The proposed approach was validated to predict the system performance and EWT of the GSHP system.

**Key words:** Artificial neural network(인공신경망), Modular ground heat exchanger(모듈러형 지중열교환기), Real-scale experiment(실증실험), Heating performance(난방성능)

†Corresponding author

E-mail: [namyujin@pusan.ac.kr](mailto:namyujin@pusan.ac.kr)

접수일: 2022년 07월 25일; 심사일: 1차:2022년 08월 16일, 2차:2022년 08월 31일; 채택일: 2022년 08월 31일

## 1. 서 론

유엔기후변화당사국총회(2019 United Nations Climate Change Conference)에서 ‘국가기후목표 상향동맹: 탄소중립 2050(Climatic Ambition Alliance: Net Zero 2050)’을 선언한 이래로 2020년 10월 한국, 2021년 1월 미국이 탄소중립을 선언하는 등 136개국 4,468개 기업 등이 참여하고 있다. 2018년 10월 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 ‘지구온난화 1.5°C 특별보고서’에서 권고하고 2021년 영국 글래스고에서 개최된 제26차 COP에서 합의된 지구 온도상승 억제 목표 1.5°C를 달성하기 위해 다양한 정책과

규제를 제시하고 있다. 우리나라에서도 2020년 7월 ‘한국판 뉴딜 종합계획’을 발표하고 10월 ‘2050 탄소중립 계획’ 선언, 2021년 5월 ‘2050 탄소중립위원회’ 설립하였으며, ‘기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법’, ‘2050 탄소중립 시나리오’, ‘2030 NDC’ 등의 법제화 및 계획을 수립하는 등 탄소중립 사회로 나아가기 위한 노력과 비전을 제시하고 있다. 건물부문에서도 저탄소 녹색성장을 위한 다양한 제도와 규제가 강화되고 있으며, 그 중 하나로 제로에너지건축이 이슈화되고 있다. 제로에너지빌딩(Zero Energy Building, ZEB) 달성을 위해서는 건축물 외피의 단열성능을 극대화하여 유출되는 에너지를 최소화하며 신재생에너지를 활용하여 건축물에서 필요한 에너지를 자체적으로 공급하여야 한다.

한편, 지열 히트펌프(Ground Source Heat Pump, GSHP) 시스템은 일정심도 이상에서 항온성을 가지는 지중온도를 열원으로 활용하여 건축물에 냉난방 및 급탕 에너지를 공급하는 시스템이다. 또한, GSHP 시스템은 타열원 시스템과 융합하여 보다 효과적으로 건물의 에너지 저감에 활용할 수 있기 때문에 ZEB에서 필수적인 요소로 인식되고 있다.

이러한 GSHP 시스템에 대해 국내·외로 많은 연구들이 진행되고 있다. GSHP 시스템의 지중열교환기 타입에 따라 수직밀폐형 지중열교환기의 경우 Kim et al.[1]은 실험 데이터를 기반으로 수직밀폐형 지중열교환기 시스템에서 축열탱크 설치가 시스템에 미치는 영향을 고찰하고 지열 히트펌프 시스템이 환경에 미치는 영향, 적용 가능성을 검토하였으며, Violante et al.[2]은 기존 문헌조사와 실측 데이터를 기반으로 수직밀폐형 지중열교환기 시스템에서 열교환기 형상 및 길이, 하절기 지반에 축열된 열이 동절기에 미치는 영향을 분석하였다. 수평형 지중열교환기에 관해서는 Xiong et al.[3]은 시뮬레이션에서 수평형 지중열교환기의 정확한 해석을 위해 그 방안을 제시하고 모델을 구축, 검증을 수행하였으며, Pu et al.[4]은 수평형 열교환기의 다양한 구조에 따른 시스템 성능분석을 수행하여 파이프의 굽힘 횟수가 증가할수록 채열성능이 높게 나타남을 확인하였다. 개방형 지중열교환기는 Ioan et al.[5]은 GSHP 시스템 종류에 따른 비교분석을 진행하고 개방형 시스템의 가능성을 제시하였으며, Athresh et al.[6]은 광산지대에 개방형 GSHP 시스템이 광산지대에서 발생하는 문제점(수질 등)을 고려한 새로운 설계법을 제시하였다. 또한, 시스템 성능에 큰 영향을 미치는 열적 특성과 설계변수, 경제성에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. Li et al.[7]은 포화 및 불포화 지반의 열 및 물질이동을 고려할 수 있는 지열 히트펌프 시스템의 수치해석 모델을 구축하여 해석모델을 통해 지반조건에 따른 시스템의 성능을 분석하였으며, Shin et al.[8]은 지열 히트펌프 시스템의 경제성 검토를 위해 실제 운전 데이터를 이용하여 지열 히트펌프 시스템의 초기투자비용과 운전비용을 계산하고 흡수식 냉온수기와 경제성을 평가하였다. Bae et al.[9]은 지열 히트펌프 시스템의 성능과 함께 경제적, 환경적으로 적합한 운전방법을 수치해석 모델을 통해 분석하였고 Younes et al.[10]은 GSHP 시스템에 영향을 미치는 다양한 매개변수에 대하여 연구를 진행하여 적정 순환수 유속, 그라우트 재료별 특성, 지중열교환기 직경 및 사이거리 등을 고찰하고 지중열교환기 재질은 HDPE가 가장 효율적임을 제시하였다.

이와 같이 GSHP 시스템의 최적설계를 위해서는 지중 열물성을 정확히 파악하여야 하는 추가적인 시험이 필요하고, 장기예측에 따른 성능평가가 이루어져야 한다. 하지만, 일반적으로 시공현장에서는 시스템 설계를 위한 전문 인력이 부재함으로 단위 미터 당 채열성능을 기준으로 설계가 이루어지고 있다. 이는 부정확한 설계로 이어져 지중열교환기의 과대설계로 인한 초기비용 상승 또는 과소설계로 인한 보조열원 설치에 따른 추가비용이 발생한다. 또한, 초기투자비 상승에 많은 영향을 미치는 지중 천공은 지반의 형태 및 구성에 따라 비용 및 설치기간이 더욱 증대될 수 있다. 더불어 도심지에 적용할 경우 천공을 위한 장비 반입 스페이스 등 GSHP 시스템의 접근성을 저하시키는 다양한 요인에 의해 보급이 지연되고 있는 실정이며 소규모 건축물에는 적용되기 더욱 어려운 상황에 GSHP 시스템의 인식은 더 낮아지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 지열 시스템의 보급 활성화를 위해 선행연구[11]에서 개발된 소규모 건축물에서도 적용 가능한 저심도 모듈러형 지중열교환기를 대상으로 연구를 진행하였다. 실무자들이 GSHP 시스템의 적용을 고려할 때 설계 초기단계에서 개략적인 성능 검토를 수행하여 시스템 적용 가능 여부 검토에 도

움이 되고자 실증실험과 기상청 데이터를 수집하여 인공신경망 기반 예측 모델을 구축, 그 결과를 비교하였다.

## 2. 실증실험

본 연구에서는 GSHP 시스템의 성능 평가를 목적으로 난방 입수 온도(Entering Water Temperature, EWT)를 예측하였다. 이를 위해 실증실험 및 기상청의 데이터를 토대로 입력 및 출력 변수를 수집, 적용하여 인공신경망 기반 예측 모델을 구축하였다.

### 2.1 실험 개요

Fig. 1은 실험 사이트 개요도를 나타낸다. 지열 히트펌프 시스템의 비용적, 공간적 단점을 극복하기 위하여 선행연구에서 개발된 저심도 모듈러 지중열교환기를 토대로 실험을 수행하였다. 모듈러 지중열교환기는 사각형의 프레임에 지중열교환기를 고정, 거푸집을 사용하여 콘크리트를 양생 후 저심도(2m~4m)에 매

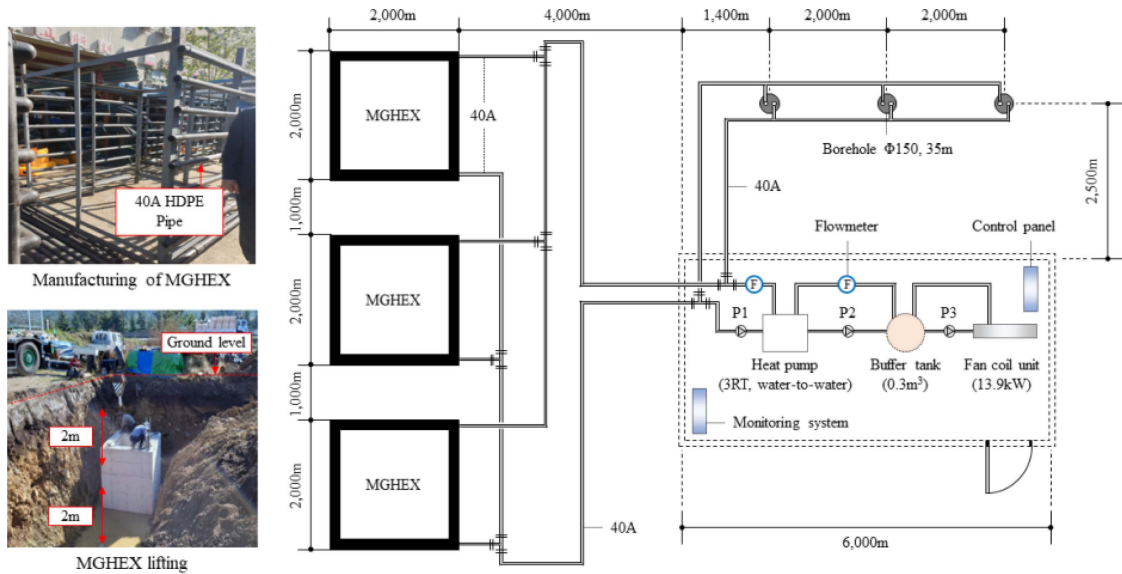


Fig. 1. Schematic diagram of experiment site.

Table 1. Specifications of the components in the system.

Heat pump	Capacity	Heating	10.69 kW
	Power consumption	Heating	3.35 kW
GHX	Pipe (HDPE)	Diameter	40 mm
	Grouting	Length	62.27 m (per unit)
HST	Capacity		300 L
	Dimension	Diameter	610 mm
		Height	1,530 mm
FCU	Capacity	Heating	12,300 kcal/h
	Power Consumption	Heating	8,800 kcal/h

설된다. 굴착 및 매설은 저심도이므로 굴삭기로 가능하기 때문에 천공비용 및 공기 단축에 유효한 영향을 미친다. 시스템은 모듈러 지중열교환기, 순환펌프, 히트펌프, 축열탱크, FCU(부하측)로 구성되어 있으며 각 설비에는 센서 및 열전대를 설치하여 순환수 입출구 온도를 측정하였다. 실험을 통해 수집된 데이터를 기반으로 인공신경망 모델을 구축하였다. 실험은 경상남도 양산시에 위치한 사이트에서 수행되었으며, 모듈러 지중열교환기를 설치, 2021년 1월 14일 13:00~17:00, 4시간 동안 난방운전을 수행하여 입력 및 출력변수에 적용될 열원측 입수 온도(EWT), 출수 온도(Leaving Water Temperature, LWT), 지중온도를 측정하였다. Table 1은 실험 설비의 성능을 나타낸다.

### 2.2 실험 결과

Fig. 2는 열원측 입·출구 온도 및 외기온도를 나타내며, Fig. 3은 부하측 입·출구 온도를 나타낸다. 실험 결과, 열원측 온도차는 평균 0.81°C, 최대 2.7°C, 부하측 온도차는 평균 1.23°C, 최대 5.2°C로 나타났으며 채열성능은 평균 4.68 kW/m로 확인되었다.

## 3. 인공신경망 예측 모델

### 3.1 인공신경망 모델 구축

Fig. 4는 본 연구에서 구축된 인공신경망 모델의 구성을 나타낸다. 본 연구에서는 모듈러형 지열 히트펌프

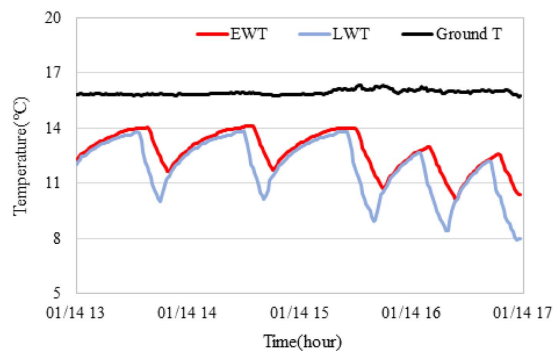


Fig. 2. Temperature of heat source side

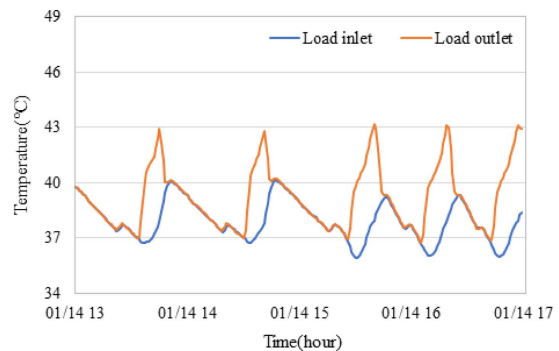


Fig. 3. Temperature of load side

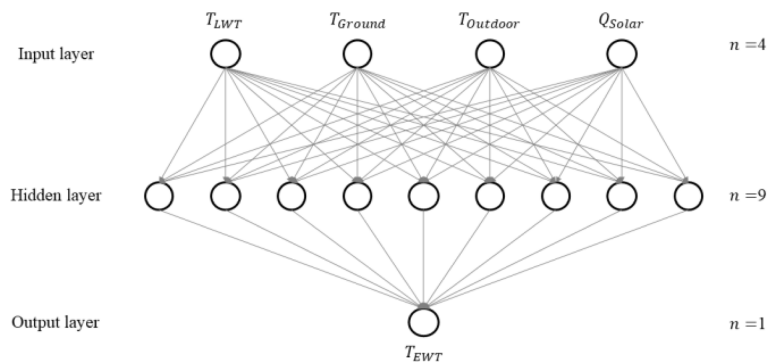


Fig. 4. Artificial neural network model

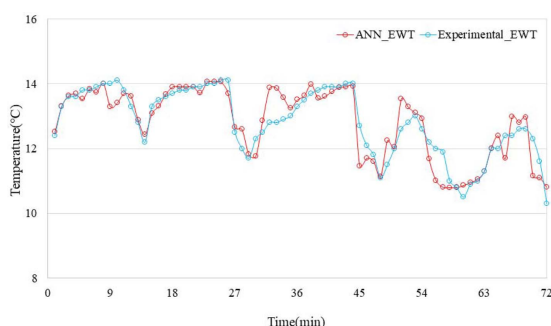


Fig. 5. Comparative analysis between experimental data and ANN predicted result

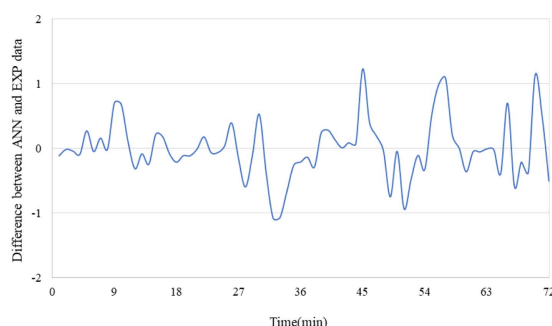


Fig. 6. Difference between ANN and experiment data

프 시스템의 EWT 예측을 위하여 계산속도가 빠르고 본 연구에서 사용된 틀에서 효율적으로 구현되는 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 활용하여 인공신경망 기반 예측 모델을 구축하였다. 인공신경망은 MathWorks사에서 개발한 MATLAB을 활용하여 입력, 은닉, 출력 총 3개의 층으로 구축, 입력변수 4가지 (LWT, 외기온도, 지중온도, 일사량), 출력 변수 1가지(EWT)를 적용하였다. 선행연구 결과를 기반으로 은닉층은  $2n+1$ 을 적용하여 9개의 노드를 형성하였으며 데이터는 데이터 정규화 방법을 적용하여 0~1 사이의 값으로 조정하였다. 변수값은 실험 데이터(EWT, LWT, 지중온도)와 기상청 데이터(일사량)에서 수집하여 적용하였으며 결과값을 도출, 실험 데이터와 오차율을 분석하였다.

### 3.2 인공신경망 모델 검증 및 결과

Fig. 5는 실험 데이터 및 인공신경망 모델의 예측결과 비교를 나타낸다. 오차율은 ASHRAE Guideline 14-2014에서 제안된 평균 제곱근 오차 변동계수[Coefficient of variation root mean square error,  $Cv(RMSE)$ ]를 활용하여 인공신경망 모델을 통해 도출된 결과와 실증실험의 측정값 비교를 통해 분석하였다. 총 4개의 입력변수(LWT, 외기온도, 지중온도, 일사량)를 적용한 인공신경망 예측 모델 결과에 대한  $Cv(RMSE)$ 는 3.52%로 나타났으며 오차 범위는 평균 0.32, 최대 1.22의 차이를 나타냈다. Fig. 6은 실험 데이터와 인공신경망 예측값의 오차를 나타낸다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 GSHP 시스템의 보급 확산을 위하여 설계 초기단계에서 시스템 성능검토를 수행하여 비용적, 시간적 접근 저해 요소를 저감시키고자 하였다. 이를 위해 실증 실험 및 기상청 데이터를 수집하여 인공신경망 모델을 구축하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 실증실험과 기상청에서 수집된 데이터를 기반으로 인공신경망 모델을 구축, GSHP 시스템의 EWT를 예측하였다.
- (2) 수집된 데이터와 인공신경망 모델 해석 결과 간  $Cv(RMSE)$ 는 3.52%로 나타나 ASHRAE Guideline 14-2014에서 제시하는 30% 범위에 수용하였다. 또한, 오차범위는 평균 0.32, 최대 1.22의 차이를 나타냈다.
- (3) 따라서, 본 연구 결과를 통해 운전에 따른 온도 변화 양상을 비교적 쉽게 수집할 수 있는 데이터를 활용하여 낮은 오차율로 예측 가능성을 확인하였다.

하지만, 본 연구 결과는 단기간의 실험 데이터를 토대로 예측을 수행하였기 때문에 구축된 모델을 난방 기간 전체에 적용하기에는 한계점이 있다. 따라서, 향후 장기간의 실험데이터 및 냉방 데이터를 추가하여

신뢰성 높은 예측 모델을 구축할 예정이다.

## 후 기

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## References

1. Kim, M. J., Seo, B. M., Lee, J. M., Choi, J. M., and Lee, K. H., 2018, Operational behavior characteristics and energy saving potential of vertical closed loop ground source heat pump system combined with storage tank in an office building, *Energy & Buildings*, Vol. 179, pp. 239-252.
2. Violante, A. C., Proposito, M., Donato, F., and Guidi, G., 2021, Preliminary study of a closed loop vertical ground source heat pump system for an experimental pilot plant (Rome, Italy), *Renewable Energy*, Vol. 176, pp. 415-422.
3. Xiong, Z., Fisher, D. E., and Spitler, J. D., 2015, Development and validation of a Slinky™ ground heat exchanger model, *Applied Energy*, Vol. 141, pp. 57-69.
4. Pu, L., Xu, L. L., Qi, D., and Li, Y. Z., 2018, Structure optimization for horizontal ground heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 136, pp. 131-140.
5. Ioan, S., and Calin, S., 2014, General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 70, pp. 441-454.
6. Athresh, A. P., Al-Habaibeh, A., and Parker, K., 2016, The design and evaluation of an open loop ground source heat pump operating in an ochre-rich coal mine water environment, *International Journal of Coal Geology*, Vol. 164, pp. 69-76.
7. Li, C. F., Cleall, P. J., Mao, Jin. F., and Munoz-Criollo, J. J., 2018, Numerical simulation of ground source heat pump systems considering unsaturated soil properties and groundwater flow, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 139, pp. 307-316.
8. Shin, J. H., Lee, J. H., Cho, Y. H., and Kim, Y. I., 2018, Economic Analysis of Geothermal Heat Pump System through Application of Operating Data, *J. of KIAEBS*, Vol. 12, No. 5, pp. 519-529.
9. Bae, S. M., and Nam, Y. J., 2022, Economic and environmental analysis of ground source heat pump system according to operation methods, *Geothermics*, Vol. 101, pp. 102373.
10. Noorollahi, Y., Saeidi, R., Mohammadi, M., Amiri, A., and Hosseinzadeh, M., 2018, The effects of ground heat exchanger parameters changes on geothermal heat pump performance-A review, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 129, pp. 1645-1658.
11. Kim, J. M. and Nam, Y. J., 2020, Development of the Performance Prediction Equation for a Modular Ground Heat Exchanger, *Energies*, Vol. 13, No. 22, pp. 6005.