DBpia

OPEN ACCESS
Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 34, No. 8(2022), pp.390-398
https://doi.org/10.6110/KJACR.2022.34.8.390
ISSN 1229-6422(Print), 2465-7611(Online)

Copyright©Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

심층신경망 기반 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능예측모델 개발

Development of Performance Prediction Model for Integrated System Combining Photovoltaic-thermal and Air Source Heat Pump based on Deep Neural Network

배상무(Sangmu Bae)[1], **채호병**(Hobyung Chae)[1], **오진환**(Jinhwan Oh)[2], **채수원**(Soowon Chae)[3], **문진우**(Jin Woo Moon)[4], **남유진**(Yujin Nam)[5†]

[1]부산대학교 생산기술연구소 박사후연구원, [2]부산대학교 건축공학과 박사과정
[3]부산대학교 건축공학과 석박통합과정, [4]중앙대학교 건축학과 교수, [5]부산대학교 건축공학과 교수

[1]*Postdoctoral Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University, Busan, 46241, Korea*
[2]*Ph.D Student, Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea*
[3]*Graduated Student, Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea*
[4]*Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea*
[5]*Professor, Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea*

(Received July 06, 2022; revision received July 24, 2022; Accepted: July 25, 2022)

Abstract The purpose of this study was to develop the performance prediction model for integrated system combining photovoltaic-thermal and air source heat pump, based on a deep neural network (DNN) model. This paper describes the overall procedure of constructing the DNN model, to predict the performance of the integrated system such as data collection method, data set configuration, and the DNN model structure. To verify the reliability of the performance prediction model based on DNN model, the coefficient of variation root mean square error (CV(RMSE)) proposed by American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers Guideline 14 was used. The CV(RMSE) between the predicted results of the DNN model, and the output variables was calculated as 5%. Thus, the reliability of the performance prediction model based on the DNN model was verified, and the performance prediction accuracy was similar to the energy simulation model.

Key words Air source heat pump(공기열원 히트펌프), Deep neural network(심층신경망), Integrated system(융복합 시스템), Photovoltaic-thermal(태양광열),

† Corresponding author, E-mail: *namyujin@pusan.ac.kr*

기호설명

COP_{SYS} : 융복합 시스템의 성능계수 [-]
C_ρ : 유체의 비열 [kJ/kg・K]
$\dot{m}$: 순환유량 [L/min]
$\dot{P}_{HP}$: 공기열원 히트펌프의 소비전력 [W]
$\dot{P}_{FCU}$: 팬코일유닛의 소비전력 [W]
$\dot{P}_{PUMP}$: 순환펌프의 소비전력 [W]
$\dot{P}_{PVT}$: 태양광열 모듈의의 생산전력 [W]
$\dot{Q}_{HP}$: 공기열원 히트펌프의 생산열량 [W]
$\dot{Q}_{PVT}$: 태양광열 모듈의 생산열량 [W]
$T_{HP,in}$: 공기열원 히트펌프의 입수온도 [℃]
$T_{HP,out}$: 공기열원 히트펌프의 출수온도 [℃]
$T_{PVT,in}$: 태양광열 모듈의 입수온도 [℃]
$T_{PVT,out}$: 태양광열 모듈의 출수온도 [℃]

www.dbpia.co.kr

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라 정부는 지속 가능한 녹색사회 실현을 위해 장기저탄소발전전략(Long-term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy)을 공표하고 산업・수송・건축 등의 부문별 추진전략을 수립하였다.[1] 특히, 건축부문에서는 제로에너지건축물(Zero Energy Building) 의무화를 통해 탄소중립(Carbon Neutral) 및 에너지 자립형 건축물 실현을 도모하고 있다. 제로에너지건축물 구현을 위해 에너지 생산이 가능한 신재생에너지 기술이 도입되고 있지만 대부분 태양광(Photovoltaic), 태양열(Solar-thermal) 그리고 지열원 히트펌프(Ground Source Heat Pump) 중심의 단일 기술이 적용되고 있다. 신재생에너지 단일 기술은 에너지 공급과 수요 사이의 시간적, 양적 불일치, 충분한 설치공간 확보 및 초기비용 등의 문제로 인해 제로에너지건축물 구현에 한계점이 있다.[2, 3]

따라서, 신재생에너지 단일 기술이 가진 기술적 한계점을 극복하고 효과적인 제로에너지빌딩 실현을 위해 하나의 시스템으로 건축물의 모든 에너지 수요(온열, 냉열, 전력)를 담당할 수 있는 신재생에너지 융복합 시스템의 개발이 필수적이다. 건축물에 열과 전기를 동시에 공급하기 위해 태양광열(Photovoltaic-thermal) 모듈과 지열원 또는 공기열원 히트펌프(Air Source Heat Pump)가 결합된 신재생에너지 융복합 시스템이 제안되고 있다.

Abu-Rumman et al.[4]은 요르단에 위치한 건축물의 높은 전력소비량과 전력 부족 현상에 대해 태양광열-지열원 히트펌프 융복합 시스템을 이용하여 극복하고자 하였으며 에너지 시뮬레이션을 통해 융복합 시스템의 타당성을 검토하였다. 그 결과, 융복합 시스템의 COP(Coefficient of Performance)는 태양열원과 지중열원의 복합 이용으로 인해 지열원 히트펌프 단독 시스템 대비 35% 향상될 수 있었다. Ruoping et al.[5]은 농촌 단독주택의 제로에너지빌딩 구현을 목적으로 태양광열-지열원 융복합 시스템의 적용 가능성을 에너지 시뮬레이션을 이용하여 평가하였다. 태양광열 모듈의 전력 생산량이 시스템의 소비전력량보다 높으므로 제로에너지빌딩을 달성할 수 있음을 확인하였다. Li and Huang[6]은 기존 공기열원 히트펌프의 불안정성을 해결하고 에너지 효율을 향상하기 위해 태양광열 모듈과 결합한 이중열원 히트펌프를 제안하였다. 본 시스템은 태양열원과 공기열원을 효과적으로 활용하여 열과 전기를 동시에 생산할 수 있었다. 또한, 기존 공기열원 히트펌프와 비교하여 이중열원 히트펌프는 열악한 환경에서도 안정적인 성능을 유지할 수 있었다. Ai et al.[7]은 공기열원 히트펌프와 태양광열 모듈이 결합한 시스템을 제안하였다. 본 시스템의 타당성을 검증하기 위해 에너지 시뮬레이션을 이용하여 태양광열 모듈의 결합 여부에 따른 시스템의 성능을 비교하였다. 태양광열 모듈이 결합된 시스템은 히트펌프 단일 시스템보다 엑서지(Exergy) 효율이 약 10% 향상되었다. Bae et el.[8]은 태양광열 모듈과 지열원 히트펌프가 결합된 융복합 시스템을 제안하고 실제 규모(Real-scale)의 실험 플랜트를 구축하고 실제 환경조건을 고려하여 시스템의 성능을 평가하였다. 융복합 시스템의 냉난방 평균 COP는 각각 6.9, 8.3으로 계산되었으며 하절기에는 태양광열 모듈에 의해 제로에너지건축물 실현이 가능함을 확인하였다.

선행연구에서는 에너지 시뮬레이션, 수학적 모델 그리고 실제 규모의 실증실험을 통해 신재생에너지 융복합 시스템의

Table 1 Previous study for integrated system using PVT, GSHP and ASHP

Author	System configuration	Analytical method	Description
Abu-Rumman et al.[4]	PVT + GSHP	Energy simulation	Performance & life cycle cost analysis of single source system and integrated system
Ruoping et al.[5]	PVT + GSHP	Energy simulation	Applicability analysis for ZEB implementation using integrated system
Li and Huang[6]	PVT + ASHP	Mathematical model	Comparative analysis between ASHP & PVT-ASHP
Ai et al.[7]	PVT + ASHP	Energy simulation	Energy and exergy analysis between ASHP & PVT-ASHP
Bae and Nam[8]	PVT + GSHP	Real-scale experiment	Evaluation of integrated system through real-scale experiment

www.dbpia.co.kr

성능분석을 수행하였다. 이러한 연구방법은 시뮬레이션 또는 수학적 모델 구축을 위해 고가의 상용프로그램이 필요하고, 모델검증과 해석과정에서 전문적인 지식과 경험이 요구된다. 특히, 실제 규모의 실증실험은 플랜트 구축을 위해 많은 예산과 전담인력이 요구되므로 시스템의 성능을 추정 및 검증하기까지 어려움이 있다.

최근, 4차산업의 핵심기술인 빅데이터와 인공지능 기술을 이용하여 신재생에너지 시스템의 성능을 예측하는 연구가 활발히 수행되고 있다.[9), (10), (11)] 인공지능 기술을 활용한 성능예측수법은 기존 연구의 접근방법과 다르게 수학적 모델이나 실증실험 플랜트의 구축이 필수적인 조건이 아니므로 예산과 해석시간을 획기적으로 단축할 수 있다. 이러한 장점들로 인해 단순히 성능예측뿐만 아니라 제어 알고리즘, 시스템 설계, 결함진단 등의 다각적인 방면에서 인공지능 기술이 이용되고 있다.[(12), (13), (14)] 그러나, 대부분의 연구는 태양광, 태양열 및 지열원 히트펌프와 같이 신재생에너지 단일 기술에 국한되어 있다. 두 가지 이상의 열원을 결합한 신재생 융복합 시스템은 복합적인 영향 인자들이 상호 연계되어 있어 해석이 어려우므로 인공지능 기술 기반의 성능예측수법에 관한 연구는 거의 없다.

따라서, 본 연구에서는 인공지능 기술을 활용한 신재생 융복합 시스템의 성능예측을 목적으로 심층신경망(DNN, Deep Neural Network) 기반 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능예측모델을 개발하고자 한다. 개발된 성능예측모델은 융복합 시스템의 초기설계단계에서 관련 종사자들에게 성능평가를 위한 간이 해석툴로 제공될 수 있으며 추후 최적제어 알고리즘 개발을 위한 기초 데이터로 활용될 것이다.

1.2 연구방법 및 범위

본 연구에서 수행한 심층신경망 기반 융복합 시스템의 성능예측모델 개발과정은 Fig. 1과 같다. 심층신경망 성능예측모델의 학습과 검증을 위해 저자의 선행연구[15]에서 구축한 시뮬레이션 모델을 이용하였다. 시뮬레이션 모델의 해석방법은 선행연구[16]에서 실증실험을 통해 검증한 성능예측모델을 참조하였다. 시뮬레이션 모델을 통해 획득한 데이터는 상관관계 분석을 통해 필터링 되고 CSV 형태의 데이터 세트로 구축된다.

데이터 세트는 학습, 검증, 시험으로 3가지 형태로 구분된다. 구분된 데이터 세트는 난수 알고리즘을 통해 무작위로 섞이고 데이터 정규화(Data Normalization) 과정을 거쳐 심층신경망 모델에 입력된다. 이후, 심층신경망 모델은 정제과정을 거친 데이터 세트에 근거하여 융복합 시스템의 성능예측을 수행한다. 인공신경망 성능예측 모델의 정확도는 시험 데이터에 대한 예측값과 실제값의 오차율 분석을 통해 검증한다.

2. 심층신경망 기반 성능예측모델 개발

2.1 데이터 수집

본 연구에서는 선행연구[15]에서 구축한 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 시뮬레이션 모델을 이용하여 심층신경망 성능예측모델 개발에 필요한 데이터를 수집하였다. Fig. 2는 융복합 시스템의 개요도와 함께 시뮬레이션 모델에서 수집한 데이터의 종류를 나타낸다.

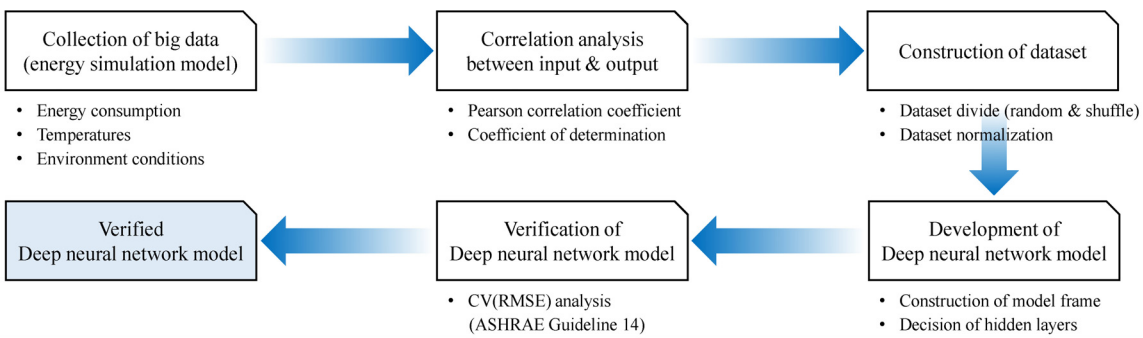


Fig. 1 Research flow.

www.dbpia.co.kr

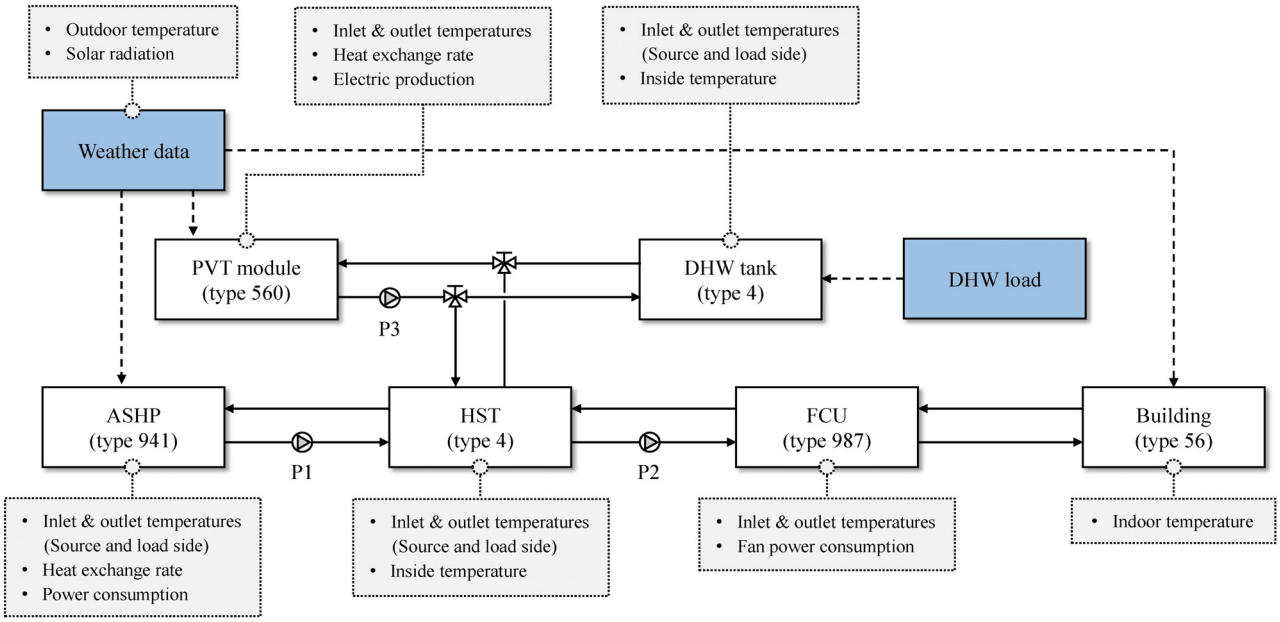


Fig. 2 Schematic diagram of integrated system combining PVT and ASHP.[15]

Table 2 Specification of the integrated system combining PVT and ASHP[15]

Equipment	Parameter	Value
PVT module	Size	1.012 × 1.972 m^2
	Thermal conductivity	386 W/m · K
	Number of tubes	21
	Tube diameter	0.0109 m
	Electrical efficiency	16 %
	Number of modules	10
Air source heat pump	Type	Air to water
	Heating capacity	11.36 kW
	Heating power consumption	2.02 kW
	Cooling capacity	7.55 kW
	Cooling power consumption	2.03 kW
Storage tank	Volume	0.3 m^3
	Height	1.0 m
	Number of tanks	2
Circulating pump	Power consumption	0.75 kW
	Number of pumps	3
Fan coil unit	Heating capacity	11.63 kW
	Cooling capacity	7.38 kW
	Fan power consumption	0.12 kW

Table 2는 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 설계사양을 나타낸다. 태양광열 모듈 1개의 크기는 1.012×1.972 m^2로 16%의 전력효율을 가진 모듈을 총 10개 설치하였다. 공기열원 히트펌프는 공기대물 방식이고 건축물의 공조면적(110 m^2)을 고려하여 난방 및 냉방용량이 각각 11.36 kW, 7.55 kW인 장비를 선정하였다.

www.dbpia.co.kr

순환펌프는 시스템의 설계용량에 근거하여 순환유량 50 L/min을 담당할 수 있는 사양으로 선정하고 태양광열 모듈, 히트펌프, 부하측 버퍼탱크에 설치되었다. 팬코일유닛은 공기열원 히트펌프의 정격용량과 건축물의 공조면적을 고려하여 난방 및 냉방용량이 각각 11.63 kW, 7.38 kW인 장비를 이용하였다.

한편, 심층신경망 모델을 이용한 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 정확한 성능예측을 위해 시스템의 성능계수 계산식에 근거하여 출력변수에 영향을 미치는 데이터를 시뮬레이션 모델을 통해 우선적으로 수집하였다. 시스템의 성능계수는 아래의 식(1)부터 식(3)까지로 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{HP} = \dot{m} C_{\rho} (T_{HP,\,out} - T_{HP,\,in}) \tag{1}$$

$$\dot{Q}_{PVT} = \dot{m} C_{\rho} (T_{PVT,\,out} - T_{PVT,\,in}) \tag{2}$$

$$COP_{SYS} = \frac{\dot{Q}_{HP} + \dot{Q}_{PVT}}{\dot{P}_{HP} + \dot{P}_{FCU} + \dot{P}_{PUMP} - \dot{P}_{PVT}} \tag{3}$$

또한, 시뮬레이션 모델을 통해 (1) 태양광열 모듈의 입출수온도 (1) 공기열원 히트펌프의 열원측 입출수온도, (3) 공기열원 히트펌프의 부하측 입출수온도, (4) 급탕탱크의 입출수온도, (5) 급탕탱크의 내부온도, (6) 부하측 버퍼탱크의 열원측 입출수온도, (7) 부하측 버퍼탱크의 부하측 입출수온도, (8) 부하측 버퍼탱크의 내부온도, (9) 팬코일유닛의 입출수온도, (10) 외기온도, (11) 실내온도, (12) 전천 일사량, (13) 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능계수에 대한 시간 데이터를 수집하였다.

2.2 데이터 세트 구축

시뮬레이션 모델을 통해 수집된 빅데이터는 입력변수와 출력변수로 구분하였다. 입력변수는 태양광열 모듈, 공기열원 히트펌프, 부하측 버퍼탱크 및 급탕탱크의 입출수온도, 생산열량, 생산전력량, 소비전력, 외기온도, 실내온도 그리고 전천 일사량 등으로 구성되어 있으며 심층신경망 모델이 예측하는 출력변수는 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능계수로 설정하였다.

심층신경망 모델의 해석시간 단축과 동시에 입력변수와 출력변수 사이의 관계성을 정량적으로 분석하기 위해 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient)를 이용하였다. 피어슨 상관계수를 통해 입력변수와 출력변수의 관계성에 대해 수치화를 수행하였다. 식(4)는 피어슨 상관계수의 계산식을 나타낸다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \overline{Y})^2}} \tag{4}$$

피어슨 상관계수는 -1부터 1까지의 실수형태로 계산되며, 상관계수가 -1 또는 1에 가까울수록 입력변수는 출력변수에 대한 상관관계가 높다. Table 3은 피어슨 상관계수(r)와 결정계수(r^2)의 결과를 나타낸다. 결정계수는 피어슨 상관계수의 결과에 근거하여 계산하였다. 결정계수는 0부터 1까지의 값을 나타낸다. 피어슨 상관계수와 결정계수가 각각 0.2 또는 0.04 미만으로 계산된 부하측 버퍼탱크의 열원측 및 부하측 입출수온도, 버퍼탱크의 내부온도, 팬코일유닛의 출수온도 등은 심층신경망 모델의 입력변수에서 제외되었다. 따라서, 출력변수와 의미있는 관계성을 가진 17개의 입력변수가 심층신경망 모델에 이용되었다.

피어슨 상관계수와 결정계수 분석을 통해 선정된 입력변수는 오버피팅(Over fitting) 방지를 위해 학습, 검증, 시험의 데이터 세트로 구분되고 전체 입력변수에 대해 60%, 10%, 30%의 비율을 가진다. 데이터 세트가 분할하는 과정에서 데이터가 하나의 범주에 치우칠 경우 모든 데이터 세트가 불완전하므로 정확한 학습과 예측이 어렵다. 따라서, 입력변수를 학습, 검증, 시험의 데이터 세트로 분할할 때 하나의 범주에 치우지지 않도록 난수 알고리즘을 이용하여 데이터를 무작위로 섞이도록 하였다.

ⓒ SAREK

www.dbpia.co.kr

Table 3 Pearson correlation coefficient and coefficient of determination

Equipment	Parameter	r	r^2
PVT module	$T_{PVT,\,out}$	0.41	0.17
	$T_{PVT,\,in}$	0.29	0.09
	$\dot{P}_{PVT}$	0.46	0.34
	$\dot{Q}_{PVT}$	0.58	0.21
Air source heat pump	$T_{HPload,\,out}$	-0.16	0.03
	$T_{HPload,\,in}$	-0.16	0.03
	$T_{HPsource,\,out}$	0.20	0.04
	$T_{HPsource,\,in}$	0.20	0.04
	$\dot{P}_{HP}$	-0.19	0.03
	$\dot{Q}_{HP}$	-0.14	0.02
DHW tank	$T_{DHW,\,out}$	0.29	0.09
	$T_{DHW,\,in}$	0.41	0.17
	T_{DHW}	0.30	0.09
Buffer tank	$T_{BTload,\,out}$	-0.16	0.02
	$T_{BTload,\,in}$	-0.15	0.02
	$T_{BTsource,\,out}$	-0.16	0.02
	$T_{BTsource,\,in}$	-0.16	0.03
	T_{BT}	-0.15	0.02
Fan coil unit	$T_{FCU,\,out}$	-0.14	0.02
	$T_{FCU,\,in}$	0.24	0.06
	$\dot{P}_{FCU}$	-0.19	0.04
Circulating pump	$\dot{P}_{PUMP1}$	-0.15	0.02
	$\dot{P}_{PUMP2}$	-0.19	0.04
	$\dot{P}_{PUMP3}$	0.24	0.06
Others	$T_{outdoor}$	0.20	0.04
	T_{indoor}	0.24	0.06
	I_r	0.58	0.34

한편, 시뮬레이션 모델에서 취득한 입력변수는 고유의 단위에 따라 데이터의 수치적 차이가 발생한다. 특히, 생산열량, 생산전력, 소비전력과 같은 데이터는 온도 데이터보다 수치적으로 큰 값을 나타낸다. 인공신경망 학습과정에서 수치가 작은 데이터는 출력변수와 관계성이 없는 것으로 간주하여 낮은 가중치(Weight)가 부여된다. 따라서, 심층신경망 모델의 정확한 예측을 위해 모든 데이터의 수치적 크기를 데이터 정규화를 통해 0부터 1 사이의 값을 갖도록 변환하였다. 식(5)는 데이터 정규화 방법을 나타낸다.

$$X_{normal} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \tag{5}$$

2.3 심층신경망 모델

태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템은 기존의 단독 열원 시스템보다 데이터의 양이 많고 입력변수들이

www.dbpia.co.kr

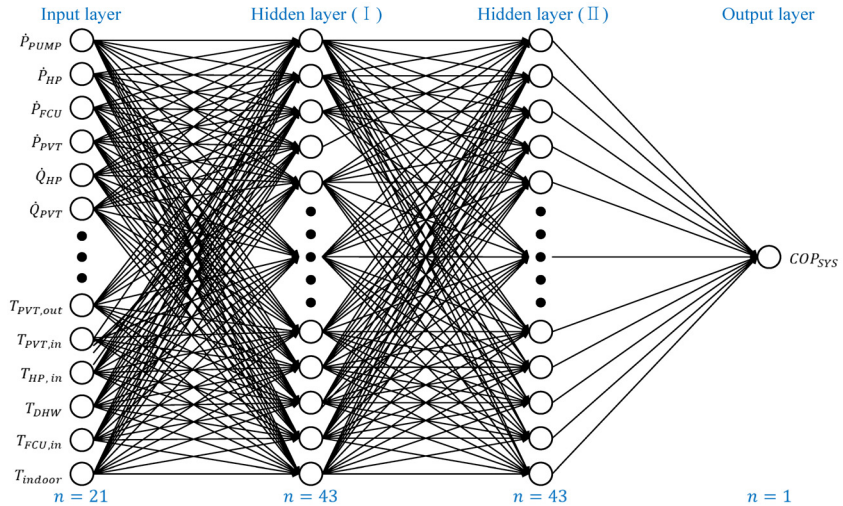


Fig. 3 Deep neural network model for integrated system.

복합적으로 연계되어 있어 성능예측에 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 변수의 특성에 제한받지 않으며 입력변수 간의 비선형적 관계를 학습할 수 있는 심층신경망 모델을 이용하였다. 한편, 심층신경망은 데이터의 양이 많을수록 예측성능이 향상되므로 많은 양의 데이터 추출이 가능한 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능예측에 적합한 것으로 판단하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 이용된 심층신경망 기반 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능예측모델을 나타낸다. 심층신경망을 이용한 성능예측모델은 1개의 입력층(Input layer), 2개의 은닉층(Hidden layer), 1개의 출력층(Output layer)으로 구성된다.

입력층은 상관관계 등의 정제과정을 거친 입력변수를 이용하여 21개의 노드(n, Node)로 형성되었다. 은닉층의 노드 개수는 선행연구에서 도출한 은닉층의 최적 노드 개수에 근거하여 43개($2n$+1)로 설정하였다.[17] 은닉층의 개수는 Case Study를 통해 2개로 결정하였다. 은닉층 개수를 3개 이상으로 구축하였을 때 해석시간은 은닉층의 개수에 따라 더욱 많이 소요되었지만, 심층신경망의 예측성능에 유의미한 영향은 없었다. 출력층은 인공신경망 모델이 도출하는 최종 예측값으로서 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능계수로 설정하였다.

3. 심층신경망 기반 성능예측모델 검증

본 연구에서 개발한 심층신경망 기반 성능예측모델의 신뢰성 검증은 ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers) Guideline 14에서 제안하는 평균 제곱급 오차 변동계수(CV(RMSE), Coefficient of variation root mean square error)를 이용하여 평가하였다.[18] ASHRAE Guideline 14에서는 시간 데이터를 기준으로 CV(RMSE)가 30% 이하일 때 신뢰성을 가지는 것으로 제안하고 있으며, 0%에 가까울수록 신뢰성이 높다. CV(RMSE)는 아래의 식(6)과 식(7)을 통해 나타낼 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\Sigma(y_s - y_a)^2}{n}} \tag{6}$$

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100 \tag{7}$$

Fig. 4는 심층신경망 기반 성능예측모델의 예측결과 값과 시뮬레이션 모델을 통해 입력된 출력변수를 나타낸다. 예측결과 값과 출력변수 사이의 CV(RMSE)는 5%로 계산되었다. 본 연구에서 개발한 심층신경망 기반 성능예측모델은 ASHRAE Guideline 14에서 제안한 기준을 만족하였다.

ⓒ SAREK

www.dbpia.co.kr

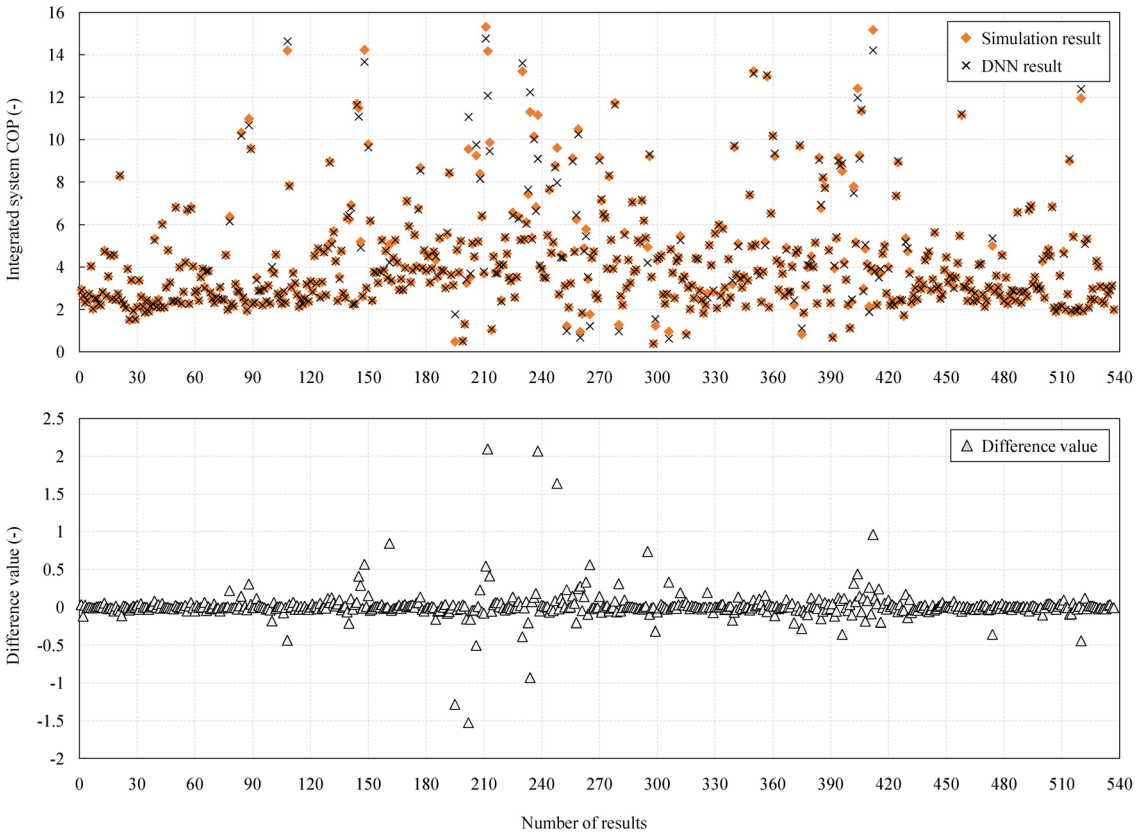


Fig. 4 Comparative analysis between simulation result and DNN result.

4. 결 론

본 연구에서는 심층신경망 기반 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능예측모델 개발을 수행하고, 개발된 성능예측모델의 신뢰성은 ASHRAE Guideline 14에서 제안하는 CV(RMSE) 오차 분석 방법을 통해 검증하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약하였다.

(1) 에너지 시뮬레이션을 이용하여 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 입력변수를 수집하고, 피어슨 상관계수 및 결정계수를 통해 데이터를 정제하였다. 정제된 21개의 입력변수는 학습, 검증, 평가로 구분되었고 난수 알고리즘과 데이터 정규화를 통해 데이터 세트를 구축하였다.

(2) 입력변수 간의 비선형적 조합과 관계의 학습이 가능한 심층신경망 모델을 구축하였다. 심층신경망 모델의 구조는 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되어 있으며 입력층의 노드개수는 21개, 은닉층의 노드개수는 43개로 설정되었다. 은닉층의 개수는 Case Study를 통해 2개로 결정하였다.

(3) 심층신경망 모델의 신뢰성은 ASHRAE Guideline 14의 CV(RMSE) 방법을 이용하였다. 심층신경망 모델의 예측결과 값과 출력변수 사이의 CV(RMSE)는 5%로 계산되었다. 따라서, 본 연구에서 개발한 심층신경망 기반 태양광열-공기열원 히트펌프 융복합 시스템의 성능예측모델은 신뢰성을 가지는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CTAP-C163595-01). 또한, 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C2014259).

www.dbpia.co.kr

References

1. Ministry of Environment, 2020, 2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea – Towards a Sustainable and Green Society, 2050 LEDS 2020-132.
2. Bae, S. 2022. Development of Performance Prediction Method of Integrated System Using Photovoltaic-thermal and Ground Source Heat Pump (Ph.D. dissertation). Pusan National University, Busan, Repulic of Korea.
3. Lee. D. W., 2016, Seasonal Thermal Energy Stroage System, The Magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 45, No. 9, pp. 14-21.
4. Abu-Rumman, M., Hamdan, M. A., and Ayadi, O., 2020, Performance Enhancement of a Photovoltaic Thermal (PVT) and Ground-source Heat Pump System, Geothermics, Vol. 85, pp. 101809.
5. Ruoping, Y., Xiangru, Y., Xiaohui, Y., Yunpeng, B., and Huajun, W., 2021, Performance Study of Split Type Ground Source Heat Pump Systems Combining with Solar Photovoltaic-thermal Modules for Rural Households in North China, Energy and Buildings, Vol. 249, pp. 111190.
6. Li, Z. and Huang, X., 2022, Simulation Analysis on Operation Performance of a Hybrid Heat Pump System Integrating Photovoltaic/thermal and Air Source, Applied Thermal Engineering, Vol. 200, pp. 1174693.
7. Ai. D., Xu, K., Zhang, H., Chen, T., and Wang, G., 2022, Simulation Research on a Cogeneration System low-concentration photovoltaic/thermal Coupled with Air-source Heat Pump, Energies, Vol. 15, p. 1238.
8. Bae, S. and Nam, Y., 2022, Feasibility Analysis for an Integrated System Using Photovoltaic-thermal and Ground Source Heat Pump Based on Real-scale Experiment, Renewable Energy, Vol. 185, pp. 1152-1166.
9. Shin, J. H. and Cho, Y. H., 2017, Predicting of the Geothermal Heat Pump System Coefficient of Performance Using Artificial Neural Network, Journal of the Korean Society of Living Environmental System, Vol. 24, No. 5, pp. 562-567.
10. Bae, S., Kwon, Y. S., Moon, J. W., and Nam, Y., 2021, Development of Performance Prediction Model for Water Source Heat Pump System Based on Artificial Neural Network, Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 21, No. 4, pp. 99-104.
11. Oh, J., Bae, S., and Nam, Y., 2022, Development of a Thermal and Electrical Performance Prediction Model for a Photovoltaic-thermal System Using an Artificial Neural Network, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 34, No. 4, pp. 155-162.
12. Zhang, Y., Zhou, L., Hu, Z., Yu, Z., Hao, S., Lei, Z., and Xie, Y., 2018, Prediction of Layered Thermal Conductivity Using Artificial Neural Network in Order to Have Better Design of Ground Source Heat Pump System, Energies, Vol. 11, pp. 1896.
13. Li, B., Delpha, C., Diallo, D., and Migan-Dubois, A., 2021, Application of Artificial Neural Networks to Photovoltaic Fault Detection and Diagnosis: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 138, p. 110512.
14. Noye, S., Martinez, R. M., Carnieletto, L., Carli, N. D., and Aguirre, A. C., 2022, A Review of Advanced Ground Source Heat Pump Control: Artificial Intelligence for Autonomous and Adaptive Control, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 153, p. 111685.
15. Bae, S., Chae, S., and Nam, Y., 2022, Performance Analysis of Integrated Photovoltaic-thermal and Air Source Heat Pump System Through Energy Simulation, Energies, Vol. 15, p. 528.
16. Bae, S. and Nam, Y., 2021, Comparison between Experiment and Simulation for the Development of a Tri-generation System Using Photovoltaic-thermal and Ground Source Heat Pump, Energy and Buildings, Vol. 231, p. 110623.
17. Lim K. S., Heo, C. H., Choi, Y. Y., and Lee, S. T., 2005, A Study on Standard for Determination of Hidden Layer Node Number in Artificial Multi-layer Neural Network Model, Journal of Korean Society of Water Source Science and Techonology, Vol. 13, No. 3, pp. 65-77.
18. ASHRAE, 2014, ASHRAE Guideline 14 – Measurement of Energy, Demand, and Water Savings, ASHRAE, Atalanta, GA, pp. 15-36.

ⓒ SAREK

www.dbpia.co.kr