Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 28, No. 4 (2016), pp.131-136
ISSN 1229-6422(Print), 2465-7611(Online)
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2016.28.4.131

수평형 지중 열교환기의 출구온도 예측을 위한 EnergyPlus 적용 타당성에 관한 연구

The Study on EnergyPlus Simulation Application Feasibility for Exit Air Temperature Prediction through Horizontal Geothermal Heat Exchanger

황용호(Yongho Hwang)[1], **조성우**(Sungwoo Cho)[2†]
[1]창원대학교 대학원, [2]창원대학교 건축공학과
[1]Department of Architecture, Doctoral course, Changwon International University, Gyeongnam, 51140, Korea
[2]Department of Architecture, Changwon International University, Gyeongnam, 51140, Korea

(Received February 4, 2016; revision received March 2, 2016; Accepted: March 7, 2016)

Abstract Horizontal geothermal heat exchanger is affected by various factors such as pipe length, soil temperature, and outdoor environment. Simulation program is convenient for responding to various factors. The objective of this study was to determine the feasibility of using EnergyPlus to predict exit air temperature through horizontal geothermal heat exchanger in domestic. The correlation coefficient between EnergyPlus results and experimental results was 0.825. The correlation coefficient between EnergyPlus results and mathematical results was 0.722, indicating “The two values can based on Lousi on values can be Our results indicate that it is possible to use EnergyPlus to predict exit air temperature through horizontal geothermal heat exchanger.

Key words Horizontal geothermal heat Exchanger(수평형 지중 열교환기), EnergyPlus(에너지플러스), Exit temperature(출구온도), Correlation coefficient(상관계수)

† Corresponding author, E-mail: *swcho@changwon.ac.kr*

기호설명

A : 매설관 표면적 [m^2]
C_P : 비열 [J/kg-℃]
d : 매설관 직경 [m]
h : 유체열전도율 [W/m-K]
k : 대류열전달률 [W/m^2-K]
L : 매설관 길이 [m]
m : 질량유속 [kg/s]
NU : Nusselt number
p : 매설관 둘레 [m]
Pr : Prandtl number
Re : Reynolds number
T : 온도 [℃]
V : 유속 [m/s]

그리스 문자

ν : 동점성계수(kinetic viscosity)[m^2/s]
μ : 동점성계수(dynamic viscosity)[kg/m-s]
π : 무차원 변수
ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

i : 유입
e : 출구
f : 유체
m : 평균
f : 액체
s : 표면

1. 서 론

건축물에서 소비되는 에너지 사용량의 높은 비율을 차지하는 요인으로는 난방, 냉방 및 환기에 소요되는 에너지라고 할 수 있다. 특히 독일의 경우 환기에 소요되는 에너지 사용량은 1995년 준공 이후 건축물에서는 40%에 이르고 있다고 보고[(1)]하고 있다. 국내에서도 에너지 사용량을 줄이기 위하여 1990년대 이후부터 주류가 된 고단열, 고기밀 주택의 경우 독일과 같이 환기

관련 에너지는 증가할 것으로 예측할 수 있다.

환기와 에너지는 상반되는 개념으로서 실내 공기질을 개선시키기 위하여 환기부하를 크게 하면 냉방과 난방에 소요되는 에너지 사용량은 증가하게 되고, 반대의 경우에는 실내 공기질 악화를 초래할 수 있다.

그러므로 실내 공기질 향상과 동시에 냉난방에 소요되는 에너지를 감소시키기 위해서는 냉난방 실내 설정온도에 근접한 온도 분포를 보이는 신선한 외기를 공급으로서 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

국내에서는 Cho et al.[2]는 장마철 수평형 지중열 교환기를 통과한 공기의 현열과 잠열량 변화에 대하여 현열량은 평균적으로 4.6 kJ/㎏의 열손실을 발생시키고, 잠열량은 0.7 kJ/㎏ 증가하는 것으로 실험 결과를 보고하고 있다. 또한, Kim et al.[3]는 샌드위치 판넬로 구성된 모형 돈사에 지름 200 mm, 길이 12 m 쿨튜브 시스템을 적용시켜 토양온도를 22.1~23.2℃로 일정한 온도를 유지시킨 가운데 외부 유입온도와의 비교에서 11 : 00~14 : 00시를 제외한 모든 시간에서 1.5℃ 내외의 차이를 보여주는 것으로 보고를 하고 있다.

국외에서는 Rohit et al.[4]는 인도 열대 건조지역에서 일시적 가동 아래에서 earth air tunnel에 대한 열적 성능을 평가하였으며, 열적 성능에 영향을 크게 미치는 요소로는 토양의 열전도율과 가동시간이며, 정상 상태에서는 길이 60 m, 직경 0.1 m의 earth air tunnel에 5 m/s로 공기를 유입시켰을 때, 18.8℃하강하는 효과가 있으며, 24시간 작동한 후에는 온도 하강 폭은 18.7℃~16.6℃의 냉각효과가 있는 것으로 실험 결과를 보고하고 있다. Guohui Gan[5]는 다양한 대기와 토양에 대한 earth-air heat exchanger와 열교환기와 주변 환경에 대한 상호관계에 대하여 연구를 수행하였으며, 난방 가동에 대하여 열교환기의 길이와 열교환기, 토양과 주변 환경과의 동적 상호관계의 영향에 대하여 시뮬레이션을 통하여 조사하였고, 이에 따르면 단위 길이 당 공급공기와 열전달률은 열교환기의 길이가 증가함에 따라 감소하나, 전체적인 열 획득과 공급공기의 온도 상승은 길이에 따라 증가한다고 보고하고 있다.

이와 같이 지중 열교환기 성능에 미치는 요소는 매설관 길이, 토양온도 및 외부와 주변 환경 등으로 이를 종합적으로 예측하기 위해서는 실험보다는 시뮬레이션 활용이 편리하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 EnergyPlus를 활용하여 지중 열교환기를 통과한 공기 온도 예측에 대한 타당성을 알아보고자 한다.

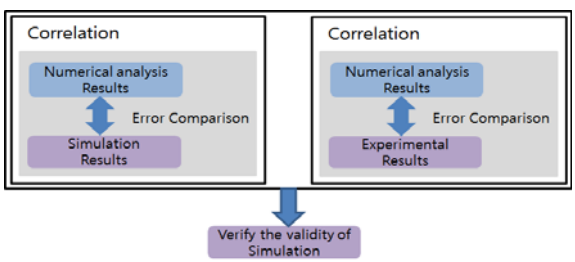

Fig. 1 Schematic of review procedures.

2. 연구방법

EnergyPlus를 활용하기 위해서는 일차적으로 기상 데이터가 제공되어야 하나, 본 실험이 수행된 창원 지역의 경우에는 기상 데이터가 제공되지 않는 상황이다.

그러므로 EnergyPlus를 활용하여 출구온도 예측에 대한 국내 적용 타당성을 검토하기 위하여 먼저 Energy Plus 결과값과 수치해석 결과값에 대한 오차를 비교 검토하였다. 이차적으로 실험을 통하여 EnergyPlus에 대한 오차를 검증할 필요가 있으나, 기상 데이터가 제공되지 않는 지역에서 실험을 수행하였음에 따라 직접적인 비교가 어려운 관계로 전자에서 수행한 수치해석 결과값과 비교하여 오차를 검토하고자 한다. 끝으로 수치해석을 기준으로 하여 시뮬레이션 결과값과 실험 결과값에 대한 상호간의 상관관계를 검토하고, 출구온도 예측을 위한 EnergyPlus 활용에 대한 타당성을 알아보고자 하며, 이에 대한 진행 과정은 Fig. 1과 같다.

3. 실험개요 및 이론적 고찰

3.1 수치해석[6]

지중 열교환 시스템 내로 유입되는 공기는 관 표면과 토양 표면과의 대류열전달로 인하여 유출되는 공기의 온도는 상승 또는 하강하게 된다. 지중 열교환 시스템 내에서의 공기와의 열 이동에 대한 개념도는 Fig. 2와 같고, 매설관의 표면온도는 장시간 지중에 노출되어 있으므로 동일하다고 볼 수 있으며, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$
\begin{aligned}
&mC_pT_m = h(T_m - T_s)dA + mC_p(T_m - dT_m)\\
&h(T_m - T_s)dA = mC_pdT_m\\
&\frac{d(T_s - T_m)}{T_s - T_m} = -\frac{hp}{mC_p}dx
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

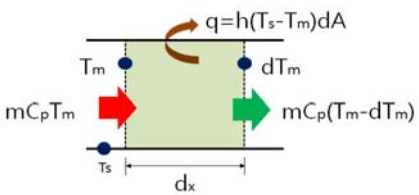

Fig. 2 Schematic of air heat exchange in system.

ⓒ SAREK

여기서 dA = pdx

$$\ln\frac{T_s - T_e}{T_s - T_i} = -\frac{hA}{mC_p} \quad (2)$$

$$T_e = T_s - (T_s - T_i)e^{-hA/mC_p} \quad (3)$$

여기서, 표면온도가 일정함에 따라 식(1)에 대한 미분방정식을 풀게 되면 식(2)와 같고, 최종적으로 출구온도 예측은 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

출구온도 예측을 위한 대류열전달률(h)은 Re 수와 Pr 수의 함수관계로써 Nu 수[7, 8]를 이용하면, 식(4)와 같고, 대류열전달률은 식(5)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$Nu = 1.86(Re\,\mathrm{Pr})^{1/3}\left(\frac{d}{L}\right)^{1/3}\left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (4)$$

$$h = \frac{k}{D}Nu \quad (5)$$

3.2 실험개요

지중 열교환기 시스템은 경상남도에 위치하고 있는 C 대학에 설치하였다. 매설깊이는 지중 3 m, 매설길이는 60 m, 매설관은 직경 100 mm의 PVC관으로 하였으며, 이에 대한 내용은 Fig. 3과 Fig 4와 같고, 측정개요는 Table 1과 같다.

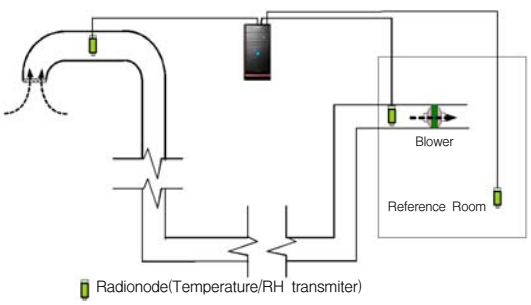

Fig. 3 Measurement schematic diagram.

Fig. 4 Inlet and Exit location of system.

Table 1 Model experiment summary

Division		Contents	
Measurement contents	Date	14. 10. 15～14. 11. 14 03：00～00：00	
		15. 8. 1～15. 8. 31 06：00～18：00	Except 8. 13～18
	Interval	60 minute	
	Point	Inlet	1 point
		Exit	
		underground 3 m	6 point
Measuring instrument	Temperature	Thermocouple	K-type
		Data logger	GL-820
Contents	Length	60 m	
	Depth	3 m depth	
	Material	PVC	ϕ 100 mm

4. 결과 및 검토

4.1 EnergyPlus를 이용한 시뮬레이션 결과

출구온도를 예측하기 위하여 EnergyPlus 입력 데이터의 내용은 Table 2와 같으며, 시스템 가동시간은 24시간으로 하였다. 대상 깊이에 대한 지중온도의 경우, 국내 기상청에서 지중온도를 제공하는 지역은 전체 관측지점의 19%에 해당됨에 따라 기 발표된 논문[9]내용을 근거로 대상 깊이 지중온도를 예측하여 입력데이터로 활용하였다. 측정기간이 중간기와 하기로 나누어짐에 따라 실험결과 분석은 중간기와 하기로 나누어 알아보고자 한다. 그리고 지표 및 지중온도와 관련한 입력데이터의 경우, 실험 대상지역의 매설깊이가 3 m에 해당됨에 따라 “Deep”에 입력하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 측정기간별 결과는 Fig. 5와 Fig. 6과 같다.

중간기 평균 외기공기 온도 분포는 8.1℃～25.9℃ 이고, 시뮬레이션 결과 시스템을 통과한 출구공기의 온도분포는 18.8℃～20.7℃이며, 변화폭은 1.9℃이다.

또한, 수치해석 결과에 따르면, 출구공기 온도분포는 15.6℃～22.5℃이며, 변화폭은 6.9℃로 나타났다.

하기 평균 외기공기 온도 분포는 19.0℃～33.8℃이며, 지중 열교환 시스템을 통과한 공기온도 분포는 20.6℃～21.3℃이고, 변화폭은 0.7℃이다. 수치해석 결과, 시스템을 통과한 공기온도 분포는 19.0℃～24.7℃이며, 변화폭은 5.7℃로 나타났다.

전체 측정기간 동안 출구 공기에 대한 평균값을 살펴보면, 시뮬레이션에 의한 결과값은 20.4℃, 수치해석의 결과값은 20.0℃로 2.0%이며, Table 3과 같다.

Table 2 Input data for EnergyPlus

Division	Contents	
Site location	Latitude 35.21°, Longitude 128.7°	
Site ground temperature : Deep	January	16.8
	February	15.1
	March	14.0
	April	13.8
	May	14.2
	Jun	15.3
	July	17.1
	August	18.9
	September	20.3
	October	20.4
	November	19.7
	December	18.4
System type	intake	
Pipe radius	0.05 m	
Pipe length	60 m	

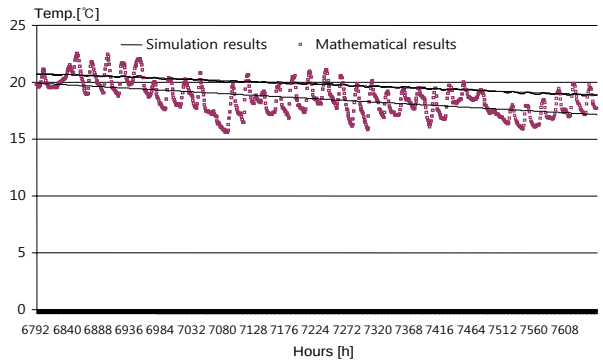

Fig. 5 Comparison simulation results and mathematical results for 2014. 10. 10～2014. 11. 14.

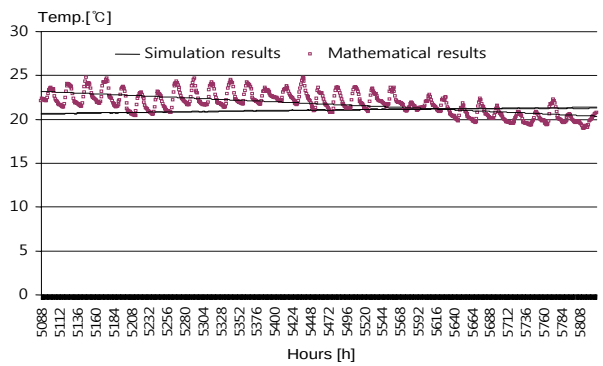

Fig. 6 Comparison simulation results and mathematical results for 2015. 8. 1～2015. 8. 31.

Table 3 Simulation and mathematical results during 2014. 10. 10～11. 14 and 2015. 8. 4～8. 31.

	Outdoor[℃]	Simulation results[℃]	Mathematical results[℃]
Average	20.8	20.4	20.0
Maximum	33.8	21.3	24.7
Minimum	8.1	18.8	15.6

4.2 실험결과

지중 열교환기 시스템의 성능에 크게 영향을 미치는 요소인 지중 깊이를 3 m로 설정하였으며, 측정기간은 열획득(중간기)과 열방출(하기) 시기를 고려하여 측정하였으며, 전 측정기간 동안 평균 외기온도는 15.4℃로 나타났으며, 평균 지중온도는 19.5℃를 보이는 것으로 나타났으며, 이에 대한 내용은 Fig. 7과 같다.

중간기에 해당되는 2014. 10. 10～2014. 11. 14 동안 평균 외기온도와 지중온도는 각각 12.9℃, 19.4℃로 지중온도가 높게 나타났고, 2015. 8. 4～2015. 8. 31 동안 평균 외기온도와 지중온도는 각각 29.5℃, 20.1℃로 유입되는 공기 온도가 높게 나타났으며, 각각에 대한 측정 결과 내용은 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 나타났다.

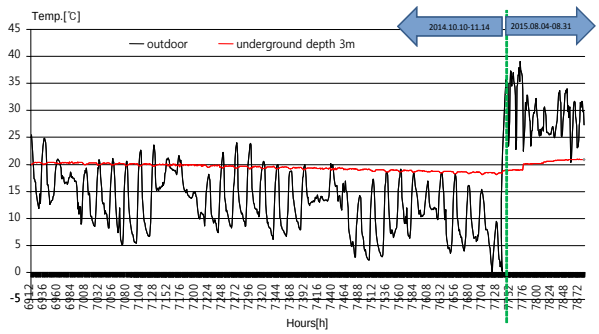

Fig. 7 Average outdoor and underground temperature.

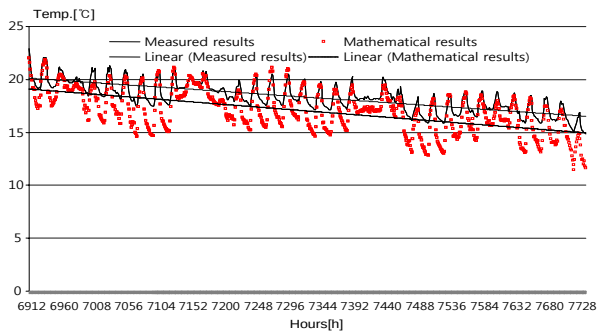

Fig. 8 Comparison measured results and mathematical results for 2014. 10. 10～2014. 11. 14.

ⓒ SAREK

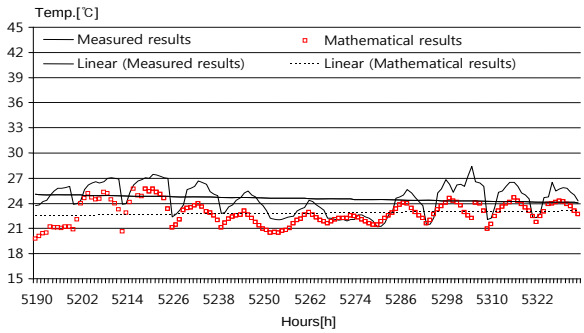

Fig. 9 Comparison measured results and mathematical results for 2015. 8. 4～2015. 8. 31.

Table 4 Measured and mathematical results during 2014. 10. 10～11. 14 and 2015. 8. 4～8. 31.

	Outdoor [℃]	Measured results [℃]	Mathematical results [℃]
Average	15.4	19.3	17.9
Maximun	39.1	28.4	25.7
Minumun	-0.6	14.9	11.4

중간기 평균 외기 온도 분포는 -0.6℃～25.5℃이며, 시스템을 통과한 출구 공기 온도 분포는 14.9℃～22.9℃를 보이고 있으며, 변화폭은 8.0℃이고, 수치해석 결과에서는 출구공기 온도분포가 11.4℃～22.0℃이고, 변화폭은 7.1℃로 비슷한 변화폭으로 나타났다.

하기 평균 외기공기 온도 분포는 20.4℃～39.1℃이며, 출구 공기 온도 분포는 21.2℃～28.4℃이고, 변화폭은 7.2℃이다. 수치해석 결과, 시스템을 통과한 공기온도 분포는 19.8℃～25.7℃이며, 변화폭은 5.9℃로 나타났다. 전체 측정기간 동안 시스템을 통과한 출구 공기의 평균온도 측정 결과값은 19.3℃이고, 수치해석 결과값은 17.9℃로, 오차는 7.8%의 차이가 나타났으며, 이에 대한 결과를 정리한 내용은 Table 4와 같다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 보듯이 전체적으로 수치해석결과보다 실험측정값의 결과가 다소 높게 나타난 것을 볼 수 있다.

이는 외기 도입을 위하여 매설관의 중간 부분에 설치된 블로워 작동으로 관 내부의 온도 상승이 공기온도 상승에 영향을 미치므로, 이를 감안하면 오차 폭은 다소 줄어들 것으로 판단된다. 실험측정과 수치해석 결과값의 표준편차 각각 2.65와 2.83으로 나타났다.

4.3 타당성 검토

EnergyPlus를 이용한 지중 열교환 시스템의 출구온도 예측에 대한 타당성을 검토하기 위하여 세 가지 결과에 대한 상관관계는 중요한 요소라고 할 수 있다.

지중 열교환 시스템의 출구온도 예측실험은 실측값에 의한 결과값이고, EnergyPlus에서는 대상지역이 다른 표준 기상 데이터에 의한 결과값으로 상호간에 직접적인 비교가 어렵다고 할 수 있다. 그러나 수치해석 결과값은 실험에서 구한 실측값과 표준 기상 데이터의 입력값을 이용하여 각각 얻은 결과이므로, 실험 결과값과 수치해석에 의한 결과값의 비교, EnergyPlus 결과값과 수치해석에 의한 결과값에 대한 오차 및 상관관계를 각각 검토하므로, 이에 대한 타당성을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

EnergyPlus를 활용하여 지중 열교환 시스템의 출구온도를 예측하기 위하여 실험과 수치해석 결과를 비교하였고, 수치해석 결과와 EnergyPlus 결과값을 비교하여 EnergyPlus 적용 타당성을 검증하기 위해서 3가지 항목에 대한 오차 검토를 한 결과, 전자에서는 7.8%의 오차가 발생하였으나, 온도 상승 폭을 감안하면 오차는 어느 정도 줄어들 것으로 판단되고, 후자에서는 2.0%로 오차가 작게 나타난 것을 알 수 있다.

그리고 각 항목에 대한 상호간 상관관계의 파악은 상관계수를 이용할 수 있으며, 상관계수는 높을수록 상호간의 관계가 밀접하다는 것을 의미하게 된다.

Lousi et al.[10]는 두 요소간의 상관관계를 분석한 결과로서 도출되는 상관계수에 대한 결과값이 0.4～0.6인 경우 “Relatively strong association”, 0.6～0.8인 경우 “strong association”이고 0.9 이상인 경우 “very strong association”라고 해석하고 있다.

본 논문에서 각각의 결과값에 대한 상관계수는 Table 5, Table 6과 같고, 실험 측정과 수치해석 결과값의 상관계수는 0.949, EnergyPlus와 수치해석 결과값에서는 0.753으로 수치해석 결과값을 중심으로 EnergyPlus 결과값과 실험 결과값 모두에서 “strong association” 이상의 범위를 나타내고 있는 것으로 파악되었다.

동일한 요소 즉 외기온도와 지중온도를 이용한 지

Table 5 Correlation coefficient between measured results and mathematical results

results	Measured	Mathematical
Measured	1	-
Mathematical	0.949	1

Table 6 Correlation coefficient between simulation results and mathematical results

results	Simulation	Mathematical
Simulation	1	-
Mathematical	0.753	1

Table 7 Correlation coefficient between simulation results, measured results and mathematical results

results	Measured	Simulation	Mathematical
Measured	1		
Simulation	0.825	1	1
Mathematical	0.746	0.722	

중 열교환 시스템 출구온도 예측을 위하여 세 가지 방법에 의한 상호간의 상관계수는 Table 7과 같다. EnergyPlus와 실험 결과값에 대한 상관계수는 0.825, EnergyPlus와 수치해석 결과값에 대한 상관계수는 0.722로 나타남에 따라, Louis et al.[10]의 해석결과에서는 모든 결과에서 “strong association”에 속하므로 EnergyPlus를 이용하여 출구온도를 예측하는 것은 타당성이 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 EnergyPlus를 활용하여 지중 열교환 시스템을 통과한 출구온도 예측에 대한 타당성을 검토하기 위하여 수치해석과 실물실험을 수행한 결과에 대한 내용을 정리하면 아래와 같다.

(1) 전체 측정기간 동안 출구 공기에 대한 평균값을 살펴보면, EnergyPlus에 의한 결과값은 20.4℃, 수치해석의 결과값은 20.0℃로 2.0%의 오차가 나타났다. 그리고 출구 공기의 평균온도 측정 결과값은 19.3℃이며, 수치해석 결과값은 17.9℃로 7.8%의 오차가 나타났다. 그러나 측정값의 결과값은 관 내에 설치되어 있는 블로워의 가동으로 인한 영향으로 판단됨에 따라 7.8%의 오차는 다소 줄어들 것으로 사료된다.

(2) 세 가지 방법을 활용한 결과값에 대한 상관계수는 실험측정과 수치해석 결과값에서는 0.949, EnergyPlus와 수치해석 결과값에서는 0.753으로 수치해석 결과값을 중심으로 EnergyPlus 결과값과 실험 결과값 모두에서 “strong association”를 나타내고 있다.

(3) EnergyPlus와 실험 결과값에 대한 상관계수는 0.825, EnergyPlus와 수치해석 결과값에 대한 상관계수는 0.722로 나타남에 따라, Louis et al.[10]의 해석결과에 의하면 모든 결과에서 “strong association”에 속하므로 EnergyPlus를 이용하여 출구온도를 예측하는 것은 타당성이 있다고 판단된다.

후 기

본 논문은 2011년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업지원(2011-0023370)을 받아 수행된 연구의 일부입니다.

References

1. http://www.rehva.eu/index.php?id=239.
2. Cho, S. W. and Ihm, P. C., 2014, A Experimental study of horizontal geothermal heat exchanger system about total enthalpy change, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 10, No. 4, pp. 1-7.
3. Kim, M. H., Baek, G. Y., Moon, B. E., Jin, B. O., Kim, J. K., Ryou, Y. S., and Kim, H. T., 2013, The cooling system design of pig house using cool tube system, Proceeding of Korean Society for Agricultural Machinery, Vol. 18, No. 2, pp. 111-112.
4. Rohit, M., Vikas B., Ghanshyam D. A. l., Jyotirmay M., Tarun A., 2013, Transient analysis based determination of derating factor for earth air tunnel heat exchanger in summer, Energy and buildings, Vol. 58, pp. 103-110.
5. Guohui Gan, 2014, Dynamic interactions between the ground heat exchanger and environments in earth-air tunnel ventilation of buildings, Energy and buildings, Vol. 85, pp. 12-22.
6. Cho, S. W. and Ihm, P. C., 2014, A Study on burial guideline of horizontal geothermal heat Exchanger based on exit temperature, Korea journal of SAREK, Vol. 26, No. 12, pp. 553-558.
7. Yunus, A. and Robert, H. T., 2001, Fundamentals of thermal-fluids sciences, McGraw-Hill, pp. 511-512.
8. Holman, J. P., 1986, Heat Transfer-Sixth Edtion, McGraw-Hill, pp. 274-275.
9. Louis, M. R. and Richard, A. P., 2014, Designing and conducting survey research-A comprehensive guide, JOSSEY-BASS, pp. 218-219.
10. Cho, S. W. and Ihm, P. C., 2014, The Study on Prediction of underground temperature in Changwon. district, Korea journal of SAREK, Vol. 26, No. 3, pp. 97-102.

ⓒ SAREK