

## 지중튜브시스템 주요 설계 변수의 성능 평가

Evaluation on the Performance of Design Parameters  
in Earth Tube System

황용호\* · 황석호\*\* · 최정민\*\*\*†

Hwang Yong-Ho\*, Hwang Seok-Ho\*\* and Choi Jeong-Min\*\*\*†

(Received 25 April 2016; accepted 03 June 2016)

**Abstract** : Earth tube system can be installed in many ways. However, performance data on earth tube system is still insufficient. Therefore, in this study seven design parameters of earth tube systems were chosen such as underground earth tube length, depth, tube thermal conductivity, thickness, radius, soil conditions, and fan type. And the change effects in the values of the seven parameters on earth tube exit temperatures and heat transfer rate were examined through Energyplus simulations.

**Key Words** : 지중튜브시스템(Earth tube system), 설계 변수(Design parameter), 성능 평가(Performance evaluation), 에너지절약(Energy conservation)

## 기 호 설 명

$t$	: 연간 경과 일수 (days)	$Nu$	: 누셀 수
$t_o$	: 토양 표면 위상상수(days)	$A_s$	: 토양 표면 온도변화의 진폭 (°C)
$\alpha_s$	: 토양 열확산율 (m <sup>2</sup> /s)	$T_m$	: 평균 토양 표면온도 (°C)
$k_{air}$	: 공기 열전도율	$Re$	: 레이놀즈 넘버
$v$	: 공기의 유동성 점도	$Pr$	: 프란틀 넘버
$h_c$	: 튜브 내표면 대류열전달율(W/m <sup>2</sup> K)	$r_1$	: 튜브 내측 반경 (m)
		$V_a$	: 튜브내 평균 풍속 (m/s)
		$U_t$	: 튜브시스템 열전달율(W/m <sup>2</sup> K)

\*황용호 : (주)성화설비

\*\*황석호 : 경남대학교 건축학부

\*\*\*† 최정민(교신저자) : 창원대학교 건축학부

E-mail : jmchoi@changwon.ac.kr, Tel : 055-213-3801

\*Hwang Yong-Ho : Sunghwa Co.

\*\*Hwang Seok-Ho : Division of Architecture, Kyungnam University.

\*\*\*† Choi Jeong-Min(corresponding author) : Department of Architecture, Changwon National University.

E-mail : jmchoi@changwon.ac.kr, Tel : 055-213-3801

- $C_a$  : 공기의 비열 (J/kgK)
- $T_a(y)$  : 입구측에서 거리  $y$  이격된 지점의 공기온도 (°C)
- $m_a$  : 튜브내 공기의 질량유량 (kg/s)
- $R_t$  : 튜브내 공기와 토양 사이의 전체 열저항값( $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ )

### 1. 서 론

지중튜브시스템(Earth tube system)은 지중에 덕트나 파이프를 설치하고 건물내로 외기를 들여와서, 겨울철에 상대적으로 일정한 지중의 온도를 이용해 겨울철에는 예열을 하고, 여름철에는 예냉을 하는 자연형 냉난방 기법으로 잘 알려져 있다.<sup>4),5),6)</sup>

따라서 지중튜브시스템은 건물의 냉난방에너지 비용을 감소시키기 위한 저비용 해결책의 한가지 대안으로 고려되고 있다.



Fig. 1 A case of earth tube system (<http://www.homeintheearth.com/>)

지중튜브시스템은 다양한 디자인 변수를 가지고 설계될 수 있다. 그러나 아직까지 지중튜브시스템에 대한 성능 데이터는 부족하고 경험적으로 설치되는 경우가 일반적이다.

이에 본 연구에서는 지중튜브시스템 설치시의 변수를 선정하고, Energyplus 시뮬레이션

을 이용하여, 이들 변수가 최종 유입공기의 출구온도와 열획득(또는 손실)량에 미치는 영향을 파악하여 지중튜브시스템 설치시 참고할 수 있는 설계자료를 제시하고자 한다.

### 2. 예비적 고찰

#### 2.1 지중튜브시스템 출구온도 해석<sup>1),2),3)</sup>

지중튜브시스템이 설치된 해당 깊이에서의 토양 온도를 알아내기 위해 다음과 같은 해석을 실시한다. 일정한 열확산율을 가지는 동질 토양이라는 가정하여 설치깊이  $z$ 와 시간  $t$ 의 토양온도는 식 (1)과 같이 추정된다.<sup>2)</sup>

$$T_{z,t} = T_m - A_s \exp \left[ -z \left( \frac{\pi}{365 \alpha_s} \right)^{1/2} \right] \times \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \left[ t - t_o - \frac{z}{2} \left( \frac{365}{\pi \alpha_s} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (1)$$

토양과 지중튜브시스템 사이의 열전달과 관련하여 공기 열전도율  $k_{air}$ 와 공기의 유동성 점도  $v$ 는 식 (2)와 (3)을 이용하여 계산한다.

$$k_{air} = 0.02442 + [10^{-4}(0.6992 T_a)] \quad (2)$$

$$v = 10^{-4}(0.1335 + 0.000925 T_a) \quad (3)$$

$k_{air}$ 와  $v$ 를 가지고, 튜브 내부표면의 대류열전달율  $h_c$ 는 식 (4)와 같이 레이놀즈수  $Re$ 와 누셀 수  $Nu$ 를 이용하여 계산된다.

$$h_c = \frac{Nu k_{air}}{2r_1} \quad (4)$$

$$Nu = \frac{(f_a/2)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f_a/2)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (5)$$

$$f_a = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2} \quad (6)$$

$$Re = \frac{2r_1 V_a}{v} \quad (7)$$

$$Pr = \frac{v}{\alpha_{air}} \quad (8)$$

토양과 지중튜브 내부의 공기 사이의 열전달율은 식 (9), (10)을 이용하여 계산된다.

$$U_t [T_a(y) - T_{z,t}] dy = -m_a C_a [dT_a(y)] \quad (9)$$

$$U_t = \frac{1}{R_t} \quad (10)$$

### 2.2 지중튜브시스템의 설계 변수 설정

지중튜브시스템에서 중요한 요소는 출구온도라고 할 수 있다. 출구온도를 결정하기 위해서는 다양한 변수 즉 매설길이, 깊이, 관의 열전도율, 관의 두께, 관의 반경, 토양 상태, 팬타입 등을 들 수 있다. 이러한 변수들이 공급열량 및 출구온도에 미치는 영향을 파악할 필요가 있으며, 이를 근거로 지중튜브시스템 매설시 참고할 수 있는 설계지침이 마련되어야 한다.

Table. 1 Design parameters of earth tube system

Categ.	Input parameters	Unit
Tube	Length	m
	Depth	m
	Thermal conductivity	W/m·K
	Thickness	m
	Radius	m
Soil	Soil density	kg/m <sup>3</sup>
	Soil specific heat	J/kg·K
	Soil thermal conductivity	W/m·K
	Absorption coefficient	-
	Fraction of evaporation rate	-
Fan	Fan type	-

한편 토양의 종류와 관련된 밀도와 비열, 흡

수계수, 증발율(습기량) 변수들을 종합하여 표 2와 같은 토양 열전도율(W/m·K)과 열확산율(m<sup>2</sup>/s)값으로 나타나는 토양 종류로 구분하여 시뮬레이션에 활용한다.<sup>3)</sup>

Table. 2 Soil thermal characteristics

Soil condition	$k_s$ (W/m·K)	$\alpha_s \times 10^{-7}$ (m <sup>2</sup> /s)
Heavy soil, saturated	2.42	9.04
Heavy soil, damp	1.30	6.45
Light soil, dry	0.346	2.80

### 3. 지중온도 예측 시뮬레이션

#### (1) 시뮬레이션 개요

검토 대상지역의 토양조건을 표 2의 Heavy soil damp로 설정하고, Energyplus내의 CalcSoilSurfTemp Utility 프로그램으로 창원지역의 기상데이터의 외기온과 일사량 데이터를 이용하여 earth tube 시스템에 입력값인 지표면의 연중 평균 온도, 지표면 온도의 진폭(최대-최소)의 1/2, 지표면 온도의 위상상수값을 표 3과 같이 산출하였다. 이들 값을 기준으로 earthtube system을 통해 유입되는 공기의 출구온도값과 지중과의 유입되는 공기의 열교환량을 계산하게 된다.

Table. 3 Soil thermal variable values

Soil simulation parameters	Input values
Annual average soil surface temperature	15.3°C
Amplitude of soil surface temperature	9.0°C
Phase constant of soil surface temperature	334 days

#### (2) 주요 변수의 설정

지중튜브시스템에 대해 표 4와 같이 7가지 변수

와 해당 변수의 적용 가능한 범위를 설정하고, 중요도가 높은 변수를 파악하기 위해 각 변수값의 변화가 지중튜브로 유입되는 외기의 출구온도값과 지중과의 열교환량값을 검토하였다. 관의 반경 설계 변수에서는 관의 반경 변화에 따른 시간당 통과 공기의 유량 변화는 없는 것으로 하였다.

Table. 4 Design parameter values of earth tube system

Parameters	Values	Unit
Tube length	25, 50*, 75	m
Tube depth	1.5, 3*, 6	m
Tube thermal conductivity	100, 200*, 300	W/m·K
Tube thickness	0.01, 0.02*, 0.03	m
Tube radius	0.2, 0.25*, 0.3	m
Soil condition	Heavy and saturated, Heavy and damp*, Light and dry	-
Fan type	Intake*, Exhaust	

\* Case of reference condition

먼저 기준 조건(reference condition)의 경우, 연간 외기온과 해당 지중 깊이 3m의 지중 온도(earth tube ground interface temperature)와 지중유입 외기의 출구온도, 지중으로부터의 열교환량과 유입 공기의 출구온도 변화는 그림 2와 같이 나타났다. 연간 평균 외기온은 15.0 °C (-7.1~33.3 °C), 지중 온도는 15.2 °C (12.5~18.1 °C), 지중유입 외기의 출구온도는 15.6 °C (8.7~21.6 °C)를 보이고 있다. 그림 2에서와 같이 연간 열획득량은 977.5 kWh, 열손실량은 698.2 kWh로 나타나 열손실량이 열획득량의 71.4 % 수준을 보이고 있으며, 11월부터 4월까지의 지중으로부터 유입되는 열량이 더 많고, 5월부터 10월까지의 지중으로 손실되는 열량이 더 많은 것으로 나타났다. 이 가운데 중간기라고 볼 수 있는 4월과 10월을 제

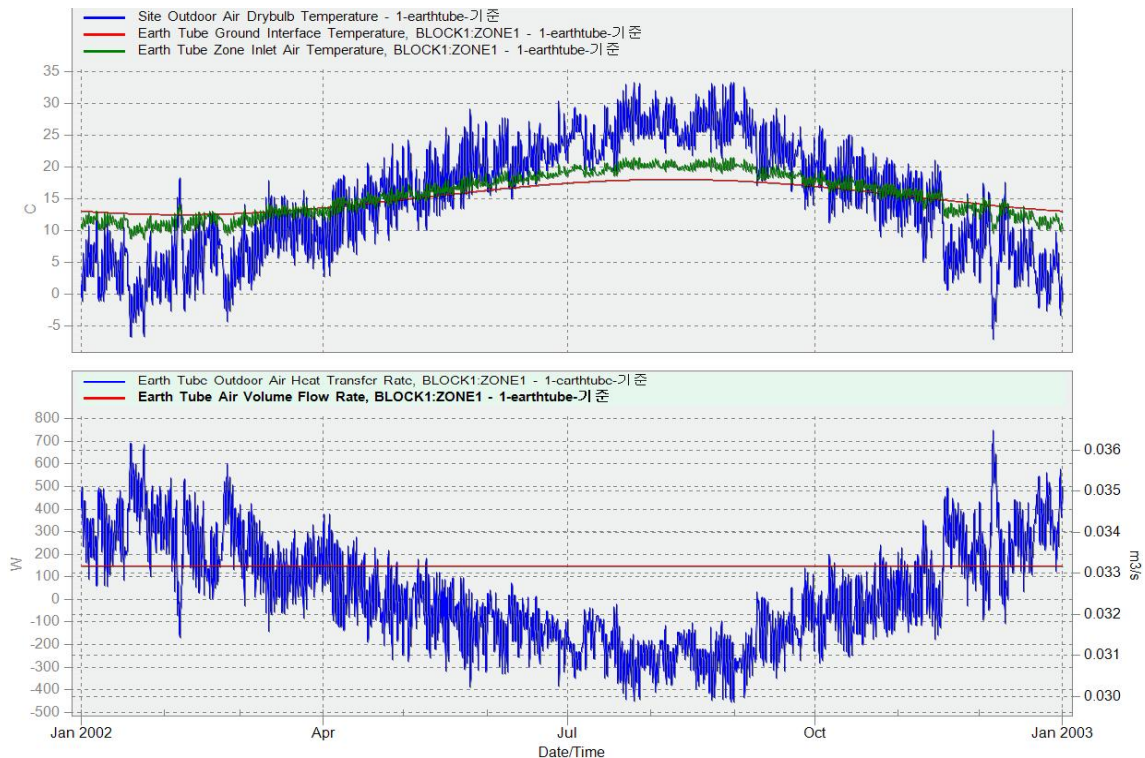


Fig. 2 Hourly results(8,760hours) of reference condition

외한 나머지 기간, 즉 11월~3월(동계기간), 5월~9월(하계기간)의 두개 기간으로 구분하여 지중으로부터의 열획득량과 손실량을 산정해 보면, 동계기간의 열획득량은 886.9 kWh, 하계기간의 열손실량은 617.1 kWh로 분석되었다.

표 5와 같이 난방기간 동안에 지중튜브시스템으로 유입되는 외기의 평균온도는 6.7 °C, 지중 온도는 13.4 °C, 지중유입 외기의 출구온도는 12.3 °C로 온도 상승은 평균적으로 5.6 °C로 이를 통해 지중으로부터의 획득되는 열량은 886.9 kWh로 나타났다. 냉방기간의 경우 외기온 평균은 23.0 °C, 지중 온도는 17.2 °C, 지중유입 외기의 출구온도는 18.8 °C로 온도 감소는 평균적으로 4.1 °C인 것으로 나타나, 지중으로 방열되는 열량은 617.1 kWh로 산정되었다.

#### 4. 지중튜브시스템 설계 변수 민감도 분석

난방 및 냉방기간으로 구분하여 7가지 변수에 따른 기간별 민감도 시뮬레이션 분석 결과는 표 5와 같이 요약되었다.

##### (1) 난방기간의 설계 변수 평가

난방기간의 경우, 지중튜브시스템의 길이와 깊이 설계 변수의 영향도는 높은 것으로 나타났다. 길이를 50 m에서 25 m로 변화시키면 출구온도는 12.3 °C에서 10.5 °C로 낮아지고, 열획득량도 886.9 kWh에서 593.8 kWh로 감소하게 된다. 75 m로 증가시키면 출구온도는 12.3 °C에서 13.3 °C로 높아지고, 열획득량도 886.9 kWh에서 1,039.18 kWh로 증가한다. 깊이의 경

Table. 5 Sensitivity analysis results of design parameter variation in earth tube system

Parameters	values	Heating period(Nov 1~Mar 31, Outdoor average temp. 6.7°C)				Cooling period(May 1~Sep 30 Outdoor average temp. 23.0°C)			
		Interface temp.(°C)	Exit temp.(°C)	Delta T (°C)	Heat gain (kWh)	Interface temp.(°C)	Exit temp.(°C)	Delta T (°C)	Heat gain (kWh)
Reference Condition	-	13.4	12.3	5.6	886.9	17.2	18.8	-4.1	-617.1
Tube length (m)	25	13.4	10.5	3.7	593.8	17.2	20.0	-2.9	-433.9
	75		13.3	6.6	1,039.1		18.4	-4.6	-685.9
Tube depth (m)	1.5	11.2	10.6	3.8	662.2	19.4	20.6	-2.4	-441.9
	6	15.3	13.8	7.1	1,108.3	15.3	17.3	-5.6	-825.0
Tube thermal conductivity (/mK)	100	13.4	12.3	5.6	886.9	17.2	18.8	-4.1	-617.1
	300		12.3	5.6	886.9		18.8	-4.1	-617.1
Tube thickness (m)	0.01	13.4	12.3	5.6	885.5	17.2	18.8	-4.2	-616.1
	0.03		12.3	5.6	888.2		18.8	-4.2	-618.1
Tube radius(m)	0.2	13.4	12.7	5.9	939.8	17.2	18.5	-4.4	-659.9
	0.3		12.0	5.3	837.1		19.1	-3.9	-576.1
Soil condition	Heavy and saturated	12.9	12.1	5.4	855.6	17.7	19.1	-3.9	-583.7
	Light and dry	14.7	12.3	5.5	867.7	15.9	18.7	-4.3	-626.5
Fan type	Exhaust	13.4	11.9	5.2	831.5	17.2	18.4	-4.6	-673.1

\* reference condition : tube length 50m, depth 3m, thermal conductivity 200W/m·K, thickness 0.02m, radius 0.25m, soil condition Heavy and saturated, fan type intake

우에는 해당 깊이를 3 m에서 1.5 m로 변화시키면 출구온도는 12.3 °C에서 10.6 °C로 낮아지고, 열획득량도 886.9 kWh에서 662.2 kWh로 감소하며, 6 m로 증가하면 출구온도는 12.3 °C에서 13.8 °C로 높아지고, 열획득량도 886.9 kWh에서 1,108.3 kWh로 증가한다. 반면에, 튜브의 열전도율과 두께의 영향은 출구온도와 열획득량에는 거의 영향이 없는 것으로 나타났다. 동일한 풍량(0.033 m<sup>3</sup>/s 고정)을 유지하는 조건하에서 튜브 관경이 0.25 m에서 0.2 m로 감소하면 출구온도와 열획득량이 12.7 °C, 939.8 kWh로 증가하며, 관경이 0.3 m로 증가하면 출구온도와 열획득량이 반대로 12.0 °C와 837.1 kWh로 감소한다. 토양조건에서는 Heavy and damp 토양에서 Heavy and saturated 토양으로 변화(열전도율과 열확산율이 더 높아지게 되면)하면 출구온도는 12.3 °C에서 12.1 °C로 감소하고, 열획득량도 886.9 kWh에서 855.6 kWh로 약간 감소하며, Light and dry 토양으로 변화하면 출구온도는 12.3 °C에서 변화가 없으나, 열획득량은 886.9 kWh에서 867.7 kWh로 약간 감소한다. 팬타입 변수에서는 Exhaust형식 선정시, 팬 모터가 공기흐름 외부에 설치되어 모터 발열이 제외되어 출구온도와 열획득량이 11.9 °C, 831.5 kWh로 감소하게 된다.

### (2) 냉방기간의 설계 변수 평가

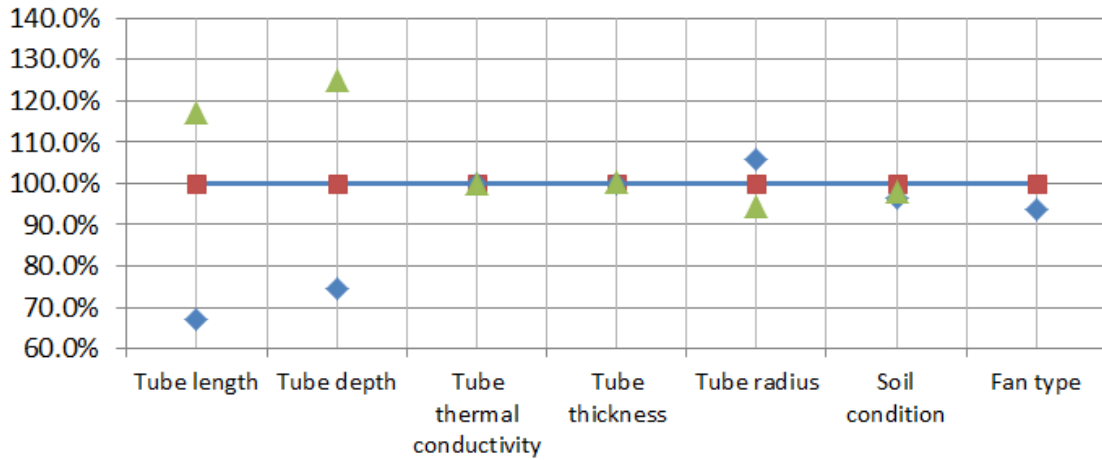
지중튜브시스템의 길이의 깊이 변화에 따른 변수의 영향도도 난방기간과 같이 높은 것으로 나타났다. 깊이를 50 m에서 25 m로 변화시키면 출구온도는 18.8 °C에서 20.0 °C로 높아지고, 열손실량도 617.19 kWh에서 433.9 kWh로 감소하며, 75 m로 증가시키면 출구온도는 18.8 °C에서 18.4 °C로 감소하고, 열손실량도 617.1 kWh에서 685.9 kWh로 증가한다. 깊이의 경우에는 해당 깊이를 3 m에서 1.5 m로 변화

시키면 출구온도는 18.8 °C에서 20.6 °C로 높아지고, 열손실량도 617.1 kWh에서 441.9 kWh로 감소하며, 6 m로 증가시키면 출구온도는 18.8 °C에서 17.3 °C로 낮아지고, 열손실량도 617.1 kWh에서 825.0 kWh로 증가하게 된다. 반면에, 튜브의 열전도율과 두께의 영향은 난방시와 유사하게 출구온도와 열획득량에 거의 영향을 미치지 않고 있다.

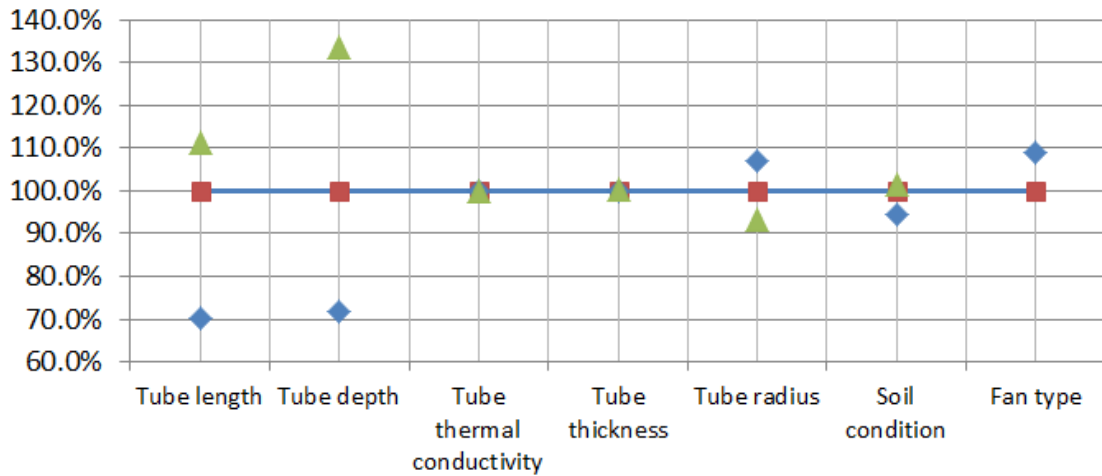
동일한 풍량(0.033 m<sup>3</sup>/s 고정)을 유지하는 조건하에서 튜브 관경이 0.25 m에서 0.2 m로 감소하면 출구온도와 열손실량이 각각 18.5 °C로 감소하고 659.9 kWh로 증가하게 되며, 관경이 0.3 m로 증가하게 되면 출구온도는 19.1 °C로 증가하고 열손실량은 576.1 kWh로 감소한다. 토양조건에서는 Heavy and damp 토양에서 Heavy and saturated 토양으로 변화(열전도율과 열확산율이 더 높아지게 되면)하게 되면 출구온도가 18.8 °C에서 19.1 °C로 증가하고, 열손실량도 617.1 kWh에서 583.7 kWh로 약간 감소하며, Light and dry 토양으로 변화시키면 출구온도는 18.7 °C로 거의 변화가 없으나, 열손실량은 617.1 kWh에서 626.5 kWh로 약간 증가하는 것으로 나타났다. 팬타입에서는 Exhaust 형식 선정시 출구온도는 18.4 °C로 감소하고, 열손실량은 673.1 kWh로 증가한다.

### (3) 민감도 분석 결과

이상의 7가지 변수에 대한 시뮬레이션 결과를 토대로 각 Case에서의 난방 및 냉방기간의 열획득(또는 손실)량을 기준 조건하의 유입공기의 열획득(또는 손실)량과 비교하여 그 편차를 기준으로 변수의 민감도를 분석을 실시한 결과는 그림 3과 같이 나타났다. 본 연구에서 선정한 지중튜브시스템의 7가지 변수중 튜브 시스템의 깊이 설계 변수의 편차(56.2%)가 가장 높게 나타났으며, 다음으로 지중튜



(a) heating period



(b) Cooling period

Fig. 3 Sensitivity analysis of 7 parameters in earth tube system

브 길이(45.5 %), 지중튜브 반경(12.6 %), 팬 타입(7.7 %), 토양종류(6.3 %), 지중튜브 두께(0.3 %), 지중튜브 열전도율(0.0 %) 순으로 나타났다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 지중튜브시스템 설치시의 변수를 선정하고, Energyplus 시뮬레이션을 이

용하여, 이들 변수가 최종 유입공기의 출구온도와 열획득(또는 손실)량에 미치는 영향을 파악하여 지중튜브시스템 설치시 참고할 수 있는 설계자료를 제시하고자 하였으며, 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 지중튜브시스템의 7가지 주요 설계 변수를 표 4와 같이 선정하여, 이들 변수가 최종 지중유입 외기의 출구온도와 열획득(또는 손실)량에 미치는 영향을

Energyplus 시뮬레이션을 통해 표 5에 제시하였다.

- (2) 선정된 지중튜브시스템의 7가지 변수중 지중튜브 깊이 설계 변수의 편차(56.2 %)가 가장 높게 나타났으며, 다음으로 지중튜브 깊이(45.5 %), 지중튜브 반경(12.6 %), 팬타입(7.7 %), 토양종류(6.3 %), 지중튜브 두께(0.3%), 지중튜브 열전도율(0.0 %) 설계 변수의 순으로 나타났다.
- (3) 특히 지중튜브시스템의 길이와 깊이 설계 변수와 관련해서는 깊이 변수의 편차가 더 높게 나타나 민감도가 더 큰 것으로 나타났다. 예로써, 기준 조건하(길이 50 m, 깊이 3 m, 난방기간 열획득량 886.9 kWh 냉방기간 열손실량 617.1 kWh)에서 길이를 25 m로 변경하는 경우(난방기간 열획득량 593.8 kWh 냉방기간 열손실량 433.9 kWh)보다 깊이를 1.5 m로 변경하는 경우(난방기간 열획득량 662.2 kWh 냉방기간 열손실량 441.9 kWh)가 더 유리한 것으로 나타났으며, 마찬가지로 깊이를 75 m로 변경하는 것(난방기간 열획득량 1039.1 kWh 냉방기간 열손실량 685.9 kWh)보다 깊이를 6 m로 하는 것(난방기간 열획득량 1108.3 kWh 냉방기간 열손실량 825.0 kWh)이 더 유리한 방안으로 나타났다. (표 5 참조)
- (4) 환경과 관련해서는 동일풍량이 유지되는 조건하에서는 환경이 작을수록 동계와 하계에 지중열량을 이용하는데 더 유리한 것으로 나타났다. 이에 대한 이유는 튜브 단면적이 작아져 튜브 내 풍속  $v$ 가 증가하게 되고, 결과적으로 레이놀즈수  $Re$ 와 누셀 수  $Nu$  및 공기열전도율  $k_{air}$ 의 증가하기 때문인 것으로 사료된다.
- (9) 추후 연구에서는 지중튜브시스템의 주요

설계 변수인 길이와 깊이 설계 변수에 대해 보다 더 다양한 조건하에서 열획득량과 열손실량을 산정할 수 있는 연구를 진행할 예정이며, 이와함께 튜브 환경 변화와 유량 변화가 지중열 이용에 미치는 영향에 대한 검토도 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 황용호의 박사학위 논문의 일부를 발췌한 것이며, 본 연구를 위해 마산지역 기상과일을 제공하여 주신 충북대학교 서동현교수에게 감사드립니다.

## Reference

1. Energyplus Engineering Reference, pp. 1293-1299, 2013.
2. M. Krarti, C. Lopez-Alonzo, D. E. Claridge and J. F. Kreider, Analytical model to predict annual soil surface temperature variation, Journal of Solar Energy Engineering, Vol.117, No.2, pp. 91-99, 1995.
3. ASHRAE, ASHRAE Handbook of HVAC Applications Table 4, pp. 11.4, 1991.
4. C. P. Jacovides and G. Mihalakakou, An Underground Pipe Systems as an Energy Source for Cooling/Heating Purposes, Renewable Energy Vol. 6, No. 8, pp. 893-900, 1995.
5. F. Al-Ajmi, D. L. Loveday and V. I. Hanby, The Cooling Potential of Earth-air HeatExchangers for Domestic Buildings in a Desert Climate, Building and Environment, 2005.
6. Y. H. Hwang, A study on the design guideline and performance of horizontal geothermal heat exchange ventilation system, Doctorial Thesis, Changwon national University, 2016.