

지열 이용 외기부하 저감시스템의 냉각 및 가열효과 예측 간이추정법에 관한 연구

A Study on the Simplified Presumption Method for the Prediction of Cooling and Heating Performance in a Fresh Air Load Reduction System by Using Geothermal Energy

손원득¹, 최영식^{2*}
Won-Tug Son¹, Young-Sik Choi^{2*}

<Abstract>

This paper presents a feasibility study of a fresh air load reduction system by using an underground double floor space. The fresh air is introduced into the double slab space and passes through the opening bored into the footing beam. The air is cooled by the heat exchange with the inside surface of the double slab space in summer, and heated in winter. This system not only reduces sensible heat load of the fresh air by heat exchange with earth but also reduces latent heat load of the fresh air by ad/de-sorption of underground double slab concrete. In this paper, we proposed a simplified presumption method for the prediction of cooling and heating performance in the system. In conclusion the proposed method has been verified by comparing with the calculated value of the numerical analysis model by using nonlinear two-dimension hygroscopic question.

Keywords : Geothermal energy, Simplified Presumption Method, Numerical Analysis

1. 서론

에너지의 안정적인 공급 확보, 지구환경문제의 대응 관점에서 자원의 제약이 없고 환경성이 우수한 자연에너지 기술개발 및 보급 활성화는 시급한 단계이다¹⁾.

자연에너지의 보급 활성화를 위해서는 자연에너지 성능에 관한 설계자료 확보가 우선적으로 해결되어야 할 과제이다. 물론 각종 시뮬레이션이나 수치해석을 통해 이러한 설계 자료를 구할 수는 있으나 통상적인 설계기간을 고려할

때 설계실무자의 이러한 접근방식은 용이하지 않은 것이 현실이다²⁾.

본 연구에서는 자연에너지와 외기부하를 키워드로 자연에너지의 하나인 지열(地熱)을 외기의 냉각 및 가열 열원으로 사용하여 외기부하처리용 에너지를 절약할 수 있는 시스템을 대상으로 하였다.

기존의 연구에서는 대상시스템의 장기간 실측을 통한 도입외기의 냉각 및 가열효과를 분석하여 에너지절약효과를 확인하였고, 지열·축열 및 방열량의 계절별 변화에 따른 연 주기

¹정회원, (주)EAN테크놀로지 이사, 工博
²교신저자, 영남이공대학, 건축과, 교수, 工博
E-mail : cys@ync.ac.kr

¹Director of EAN Technology, Ph.D.
²Corresponding Author, Prof. Dept. of Architectural Engineering

시스템 성능변화를 검토한 결과 본 시스템의 열원으로 사용된 토양은 충분한 열용량을 가지고 연 주기로 안정적 온도변화가 형성되는 것을 확인하였다³⁾.

또한 본 시스템의 열거동과 에너지 절약 및 환경부하성능을 실측값과의 비교를 통해 그 타당성이 확인된 2차원 단순열전도 방정식에 의한 수치해석모델과 HASP/ACLD/ACSS를 사용하여 정량적으로 평가하였으며⁴⁾, 본 시스템의 잠열처리효과 및 결로 발생 여부를 예측하기 위해 토양 내 열수분 동시 이동방정식에 의한 수치해석모델을 제안하고, 잠열처리효과에 관해서도 정량적으로 분석하였다⁵⁾.

본 연구에서는 2차원 열수분 동시 이동방정식에 의한 비선형 수치해석을 통한 결과를 분석하여 본 시스템의 냉각 및 가열효과 예측 간이추정식 제안을 그 목적으로 하였다.

2. 수치해석 모델의 개요

Fig. 1에 본 시스템의 개념을 나타내고 있다. 본 시스템은 외기를 공조기 팬을 건물 지하피트에 도입해서 피트 내부 지중 벽에 설치되어 있는 개구부를 통해 실내에 취출토록 하였으며, 외기는 피트 주변 토양과 열 교환에 의해 夏期에는 냉각되고, 冬期에는 가열되어 외기 현열부하를 줄이고 피트 콘크리트의 흡습성에 의해 외기 잠열부하를 감소시키는 것을 기본 개념으로 하고 있다.

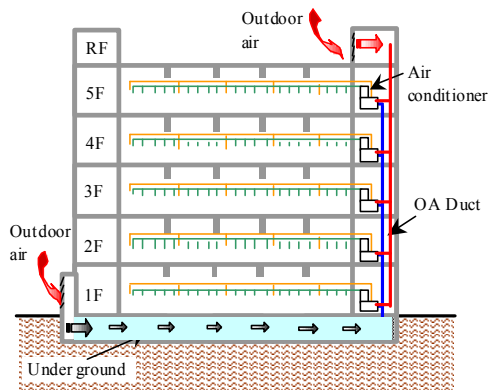


Fig. 1. The scheme of building applied earth system.

본 시스템은 쿨튜브 시스템과 유사한 시스템이지만 건물 지하피트 공간을 이용함으로써 큰 전열면적의 확보 및 초기 코스트를 대폭 절감할 수 있는 장점이 있다. 그러나 건물의 용도나 형상에 따라 지하 피트의 깊이, 단면과 길이 등이 제한되므로 이러한 조건 등을 감안하여 설계를 할 필요가 있고, 일반적인 쿨튜브 시스템에 비해 공기의 유동경로가 복잡하고 정확한 열교환 면적 파악이 용이하지가 않다.

한편 지하 피트 공간의 외기 유입경로가 복잡하고 공기의 흐름은 기본적으로 난류인 본 시스템을 상세하게 모델화하여 수치해석을 한다는 것은 설계관점에서 볼 때 비현실적이다. 더욱이 본 시스템의 전열면인 지하 피트 측면벽의 면적은 상하벽면에 비해 작으며, 외벽면 이외의 피트 측면은 토양에 접해 있지 않기 때문에 이 부분의 열 교환량은 극히 작은 것으로 생각된다(Fig. 2 참조).

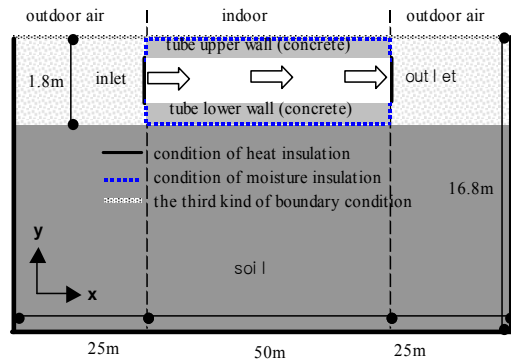


Fig. 2. The schematic of the under floor space and surrounding ground area.

또한 피트 내부 지중벽에 설치된 개구부의 형태 특성상 측면 벽과 공기 열교환은 작다는 것이 3차원 열유체 해석프로그램인 STREAM을 이용한 시뮬레이션 결과에서 확인하였다. 본 시스템이 도입되어 있는 실제 건물의 지하피트 공간에서는 고온고습한 외기가 도입되는 夏期의 경우 피트 콘크리트 표면의 결로는 발생하지 않는다는 것을 확인하였다.

이와 같은 조건에서는 피트 콘크리트 벽체 내 함수율은 비교적 낮으며, 그 내부 수분은 증기

확산지배에 의존한다고 가정 할 수 있다. 그리고 증기확산 상태에서는 열전도에 관한 물성치인 열전도율, 비열 및 흡착열 (상태변화열)은 함수율에 의해 그 값이 변화하지만, 증기확산지배의 상태에서는 함수율이 낮고 그 변동의 범위가 작기 때문에 일정한 값으로 취급할 수 있다. 단, κ , ν 의 온도 의존성은 작지 않기 때문에 κ , ν 변동에 관해서는 비선형 방정식을 사용할 필요가 있다.

이하 본 논문에서 사용한 단순 2차원계 증기확산지배방정식에 의한 계산 모델을 위해 아래와 같은 가정을 하였다 (Fig. 3 참조).

- ① 토양은 열확산만 고려
- ② 피트 콘크리트 벽체는 열과 수분이 동시에 확산되지만, 수분전달은 증기확산에 의존
- ③ 토양 최하부온도는 연평균외기온도로 일정
- ④ 피트내 공기 압력구배는 무시

이러한 가정을 바탕으로 열 및 수분 동시 이동에 의한 지하 피트 주변 및 토양의 열 전달식을 다음과 같이 나타내었다.

-주변 토양의 열평형 방정식

$$c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

-피트 콘크리트 벽체 내의 증기확산 방정식

$$(c' \rho'_a + \kappa) \frac{\partial X_c}{\partial t} = \lambda'_c \left(\frac{\partial^2 X_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X_c}{\partial y^2} \right) + \nu \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (2)$$

$$(c_c \rho_c + r\nu) \frac{\partial T_c}{\partial t} = \lambda_c \left(\frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} \right) + r\kappa \frac{\partial X_c}{\partial t} \quad (3)$$

-피트 내 공기의 열 및 수분 평형 방정식

$$c_a \rho'_a H \frac{\partial T_a}{\partial t} = c_a \rho'_a V H \frac{\partial T_a}{\partial x} + \alpha(T_{cu} - T_a) + \alpha(T_{cd} - T_a) \quad (4)$$

-피트 내 공기의 열 및 수분 평형 방정식

$$c_a \rho'_a H \frac{\partial T_a}{\partial t} = c_a \rho'_a V H \frac{\partial T_a}{\partial x} + \alpha(T_{cu} - T_a) + \alpha(T_{cd} - T_a) \quad (5)$$

$$\rho'_a H \frac{\partial X_a}{\partial t} = \rho'_a V H \frac{\partial X_a}{\partial x} + \alpha'(X_{cu} - X_a) + \alpha'(X_{cd} - X_a) \quad (6)$$

경계조건

$$\alpha(T_a - T_{cu,cd}) = \lambda_{cu,cd} \frac{\partial T_{cu,cd}}{\partial y} \quad (7)$$

$$\alpha'(X_a - X_{cu,cd}) = \lambda'_{cu,cd} \frac{\partial X_{cu,cd}}{\partial y} \quad (8)$$

$$\kappa = \rho_w \frac{\partial \theta(\phi)}{\partial \phi} \times \frac{\partial \phi}{\partial X} = \rho_w \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (9)$$

$$\nu = -\rho_w \frac{\partial \theta(\phi)}{\partial \phi} \times \frac{\partial \phi}{\partial T} = -\rho_w \frac{\partial \theta}{\partial T} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta(\phi)}{\partial \phi} = \frac{147.5(1 - \ln(\phi)/0.0453)^{1/1.67}}{(1/1.67) \times 0.0453 \phi} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial X} = \frac{0.622P}{(X + 0.622)^2 \times P_{sv}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = \frac{\phi}{P_{sv}} \times \frac{\partial P_{sv}}{\partial T} \quad (13)$$

$$\phi = \frac{PX}{P_{sv}(0.622 + X)} \quad (14)$$

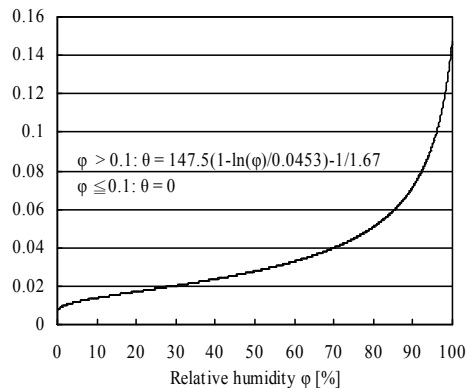


Fig. 3. The equilibrium relation between moisture content and relative humidity at adsorption.

3. 시뮬레이션 조건

실제로 도입되어진 시스템을 바탕으로 어스튜브 길이는 200m로 하고 어스튜브 단면은 7m×1.4m로 설정하였으며, 연주기계산을 위해 서울지역의 표준기상데이터를 이용하였다.

피트 내 풍속은 0.5m/s~2.0m/s의 범위를 대상으로 검토하였다. Table 1에 계산조건을 나타내고 있다. 계산법에 관해서는 시간은 전진형 차분법을, 열 및 수분확산은 중심형 차분법을, 대류는 풍상 차분법을 이용하였다. 이 때 계산 시간의 간격은 5초로 하였다. Fig. 4에 피트 콘크리트 벽체의 평형 함수율 흡습 경계곡선을

Table 1. The condition of simulation

Geometric Earth tube	Length: 50m~200m
Sectional area of Earth tube	Width: 7m Height: 1.4m
Air conditioning period	June~September in summer, December~March in winter
Air conditioning schedule	8:00~17:00 except Monday
Indoor set temperature	Summer: 26℃ uniformity, Winter: non-air conditioning :15℃, air conditioning period: 22℃, Inter-phase: mean value between summer and winter season
Operating control	On: outdoor air temperature is more than 25℃ in summer outdoor air temperature is lower than 15℃ in winter
Air velocity in earth tube	air conditioning period : 0.1~2.0m/s
Disturbance	Outdoor air temperature, solar radiation
Temperature deep in the ground	14.3℃ (annual mean outdoor air temperature)
Convective heat transfer coefficient	Underground pit: $\alpha=6.2+4.2V$ [W/(m ² K)], Indoor: 9.3 [W/(m ² K)]
Finite-difference scheme	Convection: upwind method, diffusion: central time term: forward

나타내었다. 이 평형 함수를 흡습 경 계곡선을 이용할 경우 κ , ν 는 이하의 식으로 나타낼 수 있다. Table 2에 계산에 이용된 물성치를 나타내었다.

해서 Table 1에 나타낸 바와 같이 일반적인 매립깊이와 상부거실의 온도조건을 기준으로 풍속과 튜브길이를 변수로 하여 출구온도를 계산하였다.

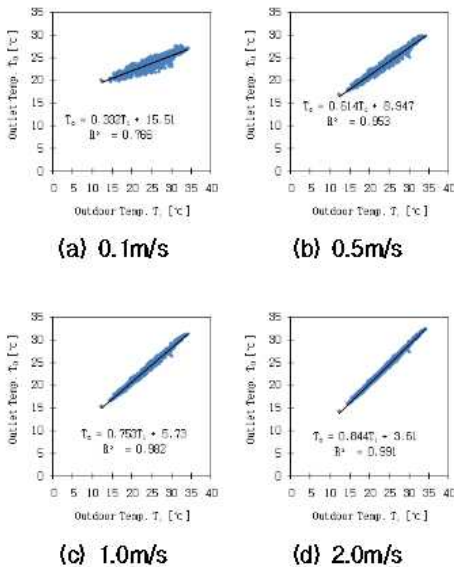


Fig. 4. The correlation of outdoor and outlet air temperature at 50m in summer.

4. 시스템의 출구온도 추정식

본 시스템의 출구온도는 매립깊이, 튜브길이(전열면적), 직경, 및 상부거실의 온도조건에 따라 달라질 수 있으나, 실제 시공조건을 고려

Table 2. Property used for simulation

$C_p \rho_s$	2800 [KJ/(m ³ K)]
$C_p \rho_c$	1900 [KJ/(m ³ K)]
ρ_w	1000 [kg/m ³]
$C_a \rho_a$	1.2 [KJ/(m ³ K)]
λ_s	2.9 [W/(mK)]
λ_c	1.5 [W/(mK)]
λ'_c	0.0035 [kg/mh(kg/kg,D.A.)]
r	2470 [KJ/kg]
c'	0.05 [m ³ /m ³]
a_r	9.3 [W/(m ² K)]
a	6.2+4.2V [W/(m ² K)]
a'	a/c_a [kg/m ³ h(kg/kg,D.A.)]

4.1 하절기 시스템의 출구온도 추정식

Fig. 4에 튜브길이 50m에서의 풍속별 하절기의 외기온도와 본 시스템의 출구온도의 상관관계를 나타내었다. 튜브길이 50m(유효전열면적:700m²)에서는 풍속0.1~2.0m/s까지 외기온도와 출구온도의 결정계수는 0.766~0.991로 높게 나타났다.

Fig. 5에 튜브길이 100m에서의 풍속별 하절기의 외기온도와 본 시스템의 출구온도의 상관관계를 나타내었다. 튜브길이 100m(유효전열면적:1400m²)에서 풍속0.1m/s의 경우 외기온도와 출구온도의 결정계수가 0.385로 낮게 나타났으

나, 0.5m/s~2.0m/s의 범위에서는0.834~0.969로 높게 나타났다. 풍속 0.1m/s 경우에서 결정계수가 작게 나타난 것은 풍량 (3528m³/h) 대비 전열면적이 충분하여 외기온도가 토양온도에 수렴한 것과 6월에 토양온도보다 외기온도가 낮은 경우 외기를 가열하여 외기온도보다 출구온도가 높은 경우가 결과에 반영된 것으로 사료된다.

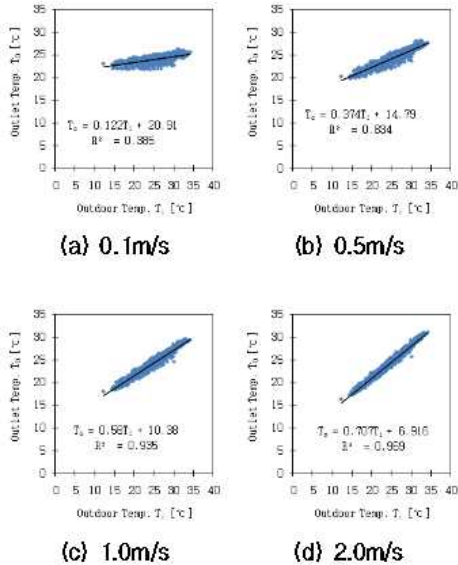


Fig. 5. The correlation of outdoor and outlet air temperature at 100m in summer.

Fig. 6에 튜브길이 150m에서의 풍속별 하절기 외기온도와 본 시스템의 출구온도와 상관관계를 나타내었다. 튜브길이 150m(유효전열면적:2100m²)에서 풍속0.1m/s의 경우 출구온도는 하절기 동안 거의 일정한 온도(기간평균온도:24.2℃)를 유지하여 결정계수는 매우 낮게 나타났으며, 0.5m/s에서도 외기온도가 토양온도에 수렴하는 경향이 조금 나타나 결정계수가 0.669로 약간 낮게 나타났다. 1.0m/s ~2.0m/s의 범위에서는 0.863~0.935로 높게 나타났다. Fig. 7에 튜브길이 200m에서의 풍속별 하절기 외기온도와 본 시스템의 출구온도와 상관관계를 나타내었다. 튜브길이 200m(유효전열면적:2800m²)에서 풍속 0.1m/s~0.5의 경우 출구온도는 하절기 동안 거의 일정한 온도(각 풍속

에서 기간평균출구온도: 24.4℃, 24.2℃)를 유지하여 결정계수는 각각 0.069, 0.497로 매우 낮게 나타났으며, 1.0m/s~2.0m/s의 범위에서는 0.775~0.891로 높게 나타났다.

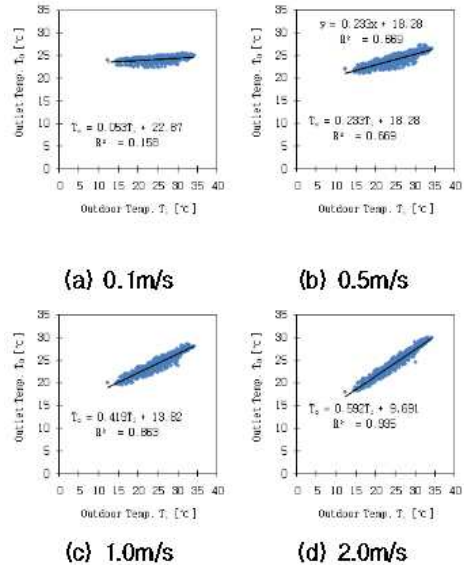


Fig. 6. The correlation of outdoor and outlet air temperature at 150m in summer.

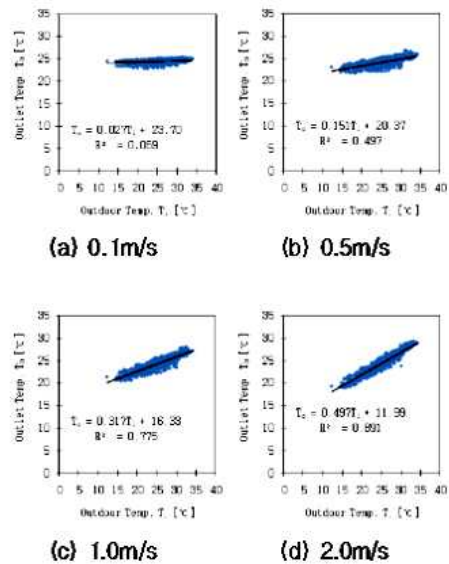


Fig. 7. The correlation of outdoor and outlet air temperature at 200m in summer.

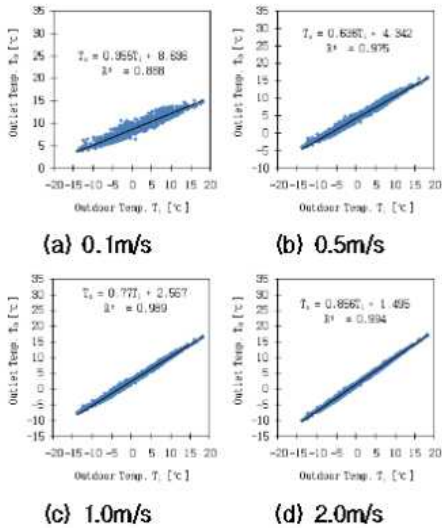


Fig. 8. The correlation of outdoor and outlet air temperature at 50m in winter.

Fig. 6~8에 나타난 바와 같이 하절기의 경우 0.1m/s(3528m³/h) 풍속에서는 튜브길이 100m(유효전열면적:1400m²), 0.5m/s에서는 튜브길이 200m에서 각각 외기온도가 토양온도에 수렴하는 것으로 나타났다.

이는 각각의 풍량에 대해 충분한 전열면적이 확보되어 외기와 토양이 온도평형상태가 되어 풍속별 상기에서 기술한 유효전열면적 이상은 불필요한 것을 의미한다.

한편, 이외 풍속조건 및 튜브길이에서는 외기온도와 출구온도의 상관관계 및 결정계수가 매우 높게 나타났다. 아래에 각 튜브길에서 본 시스템에 의한 외기온도를 변수로 한 출구온도의 추정식을 나타내었다.

- 튜브길이 50m에서

0.1m/s: $T_o = 0.332 T_i + 15.51$ ($R^2 = 0.766$) (15)

0.5m/s: $T_o = 0.614 T_i + 8.947$ ($R^2 = 0.953$) (16)

1.0m/s: $T_o = 0.735 T_i + 5.730$ ($R^2 = 0.982$) (17)

2.0m/s: $T_o = 0.844 T_i + 3.610$ ($R^2 = 0.991$) (18)

- 튜브길이 100m에서

0.1m/s: $T_o = 0.122 T_i + 20.91$ ($R^2 = 0.385$) (19)

0.5m/s: $T_o = 0.374 T_i + 14.79$ ($R^2 = 0.834$) (20)

1.0m/s: $T_o = 0.560 T_i + 10.38$ ($R^2 = 0.935$) (21)

2.0m/s: $T_o = 0.707 T_i + 6.916$ ($R^2 = 0.969$) (22)

- 튜브길이 150m에서

0.1m/s: $T_o = 0.053 T_i + 22.87$ ($R^2 = 0.158$) (23)

0.5m/s: $T_o = 0.233 T_i + 18.28$ ($R^2 = 0.669$) (24)

1.0m/s: $T_o = 0.419 T_i + 13.82$ ($R^2 = 0.863$) (25)

2.0m/s: $T_o = 0.592 T_i + 9.691$ ($R^2 = 0.935$) (26)

- 튜브길이 200m에서

0.1m/s: $T_o = 0.027 T_i + 23.70$ ($R^2 = 0.069$) (27)

0.5m/s: $T_o = 0.151 T_i + 20.37$ ($R^2 = 0.497$) (28)

1.0m/s: $T_o = 0.317 T_i + 16.33$ ($R^2 = 0.775$) (29)

2.0m/s: $T_o = 0.497 T_i + 11.99$ ($R^2 = 0.891$) (30)

4.2 동절기의 시스템의 출구온도 추정식

Fig. 8에 튜브길이 50m에서의 풍속별 동절기 외기온도와 본 시스템의 출구온도와의 상관관계를 나타내었다. 튜브길이 50m(유효전열면적:700m²)에서는 풍속 0.1~2.0m/s까지 외기온도와 출구온도의 결정계수는 0.888~0.994로 높게 나타났다.

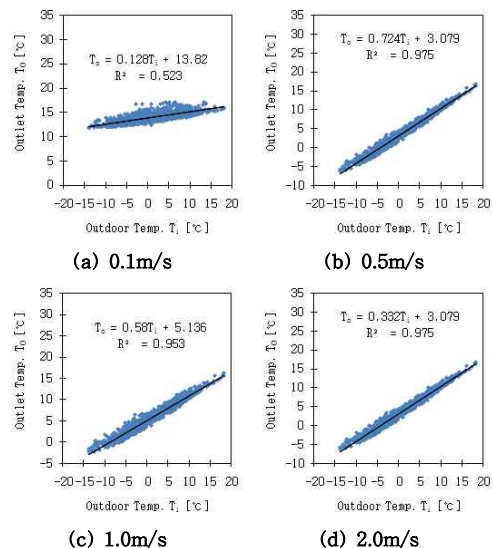


Fig. 9. The correlation of outdoor and outlet air temperature at 100m in winter.

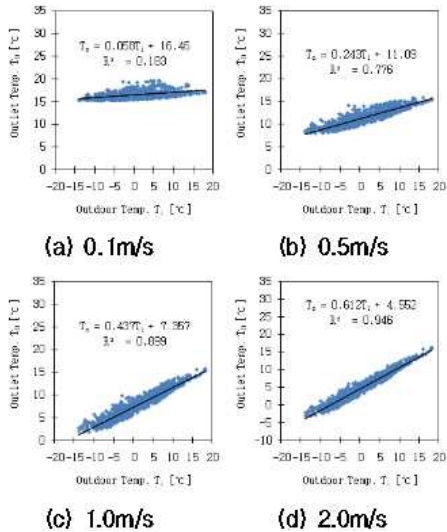


Fig. 10. The correlation of outdoor and outlet air temperature at 150m in winter.

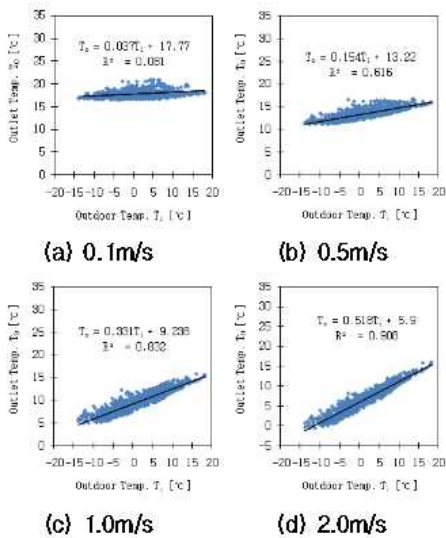


Fig. 11. The correlation of outdoor and outlet air temperature at 200m in winter.

Fig. 9에 튜브길이 100m에서의 풍속별 동절기 외기온도와 본 시스템의 출구온도와의 상관관계를 나타내었다. 튜브길이 100m(유효전열면적:1400m²)에서 풍속0.1m/s의 경우 외기온도와 출구온도의 결정계수가 0.523로 낮게 나타났으나, 0.5m/s~2.0m/s의 범위에서는 0.897~0.975

로 높게 나타났다. 풍속이 0.1m/s 경우 결정계수가 작게 나타난 것은 풍량 (3528m³/h)대비 전열면적이 충분하여 외기온도가 토양온도에 수렴한 것으로 사료된다.

Fig. 10에 튜브길이 150m에서의 풍속별 동절기 외기온도와 본 시스템의 출구온도와의 상관관계를 나타내었다. 튜브길이 150m(유효전열면적:2100m²)에서 풍속0.1m/s의 경우 출구온도는 하절기 동안 거의 일정한 온도(기간평균온도:16.5℃)를 유지하여 결정계수(0.183)는 매우 낮게 나타났다. 0.5m/s~2.0m/s의 범위에서는 0.776~0.946로 높게 나타났다.

Fig. 11에 튜브길이 200m에서의 풍속별 동절기 외기온도와 본 시스템의 출구온도와의 상관관계를 나타내었다.

튜브길이 200m(유효전열면적:2100m²)에서 풍속0.1m/s의 경우 출구온도는 하절기 동안 거의 일정한 온도(기간평균온도:17.8℃)를 유지하여 결정계수는 매우 낮게 나타났으며, 0.5m/s에서도 외기온도가 토양온도에 수렴하는 경향이 조금 나타나 결정계수가 0.616로 약간 낮게 나타났다. 1.0m/s~2.0m/s의 범위에서는 0.832~0.908로 높게 나타났다.

Fig. 8~11에 나타난 바와 같이 동절기의 경우 0.1m/s(3528m³/h) 풍속에서는 튜브길이 150m(유효전열면적:1400m²)에서 외기온도가 토양온도에 수렴하는 것으로 나타났다. 이는 하절기에 나타난 바와 같이 풍량에 대해 충분한 전열면적이 확보되어 외기와 토양이 온도평형상태가 되어 유효전열면적 이상은 불필요한 것을 의미한다.

한편, 이의 풍속조건 및 튜브길이에서는 외기온도와 출구온도의 상관관계 및 결정계수가 매우 높게 나타났다. 아래에 각 튜브길에서 본 시스템에 의한 외기온도를 변수로 한 출구온도의 회귀식을 나타내었다.

- 튜브길이 50m에서

$$0.1m/s: T_o = 0.355 T_i + 8.636 (R^2 = 0.888) \quad (31)$$

$$0.5m/s: T_o = 0.636 T_i + 4.342 (R^2 = 0.975) \quad (32)$$

$$1.0m/s: T_o = 0.770 T_i + 2.567 (R^2 = 0.989) \quad (33)$$

$$2.0\text{m/s: } T_o = 0.856 T_i + 1.495 (R^2 = 0.994) \quad (34)$$

- 튜브길이 100m에서

$$0.1\text{m/s: } T_o = 0.128 T_i + 13.82 (R^2 = 0.523) \quad (35)$$

$$0.5\text{m/s: } T_o = 0.391 T_i + 8.191 (R^2 = 0.897) \quad (36)$$

$$1.0\text{m/s: } T_o = 0.580 T_i + 5.136 (R^2 = 0.953) \quad (37)$$

$$2.0\text{m/s: } T_o = 0.724 T_i + 3.079 (R^2 = 0.975) \quad (38)$$

- 튜브길이 150m에서

$$0.1\text{m/s: } T_o = 0.058 T_i + 16.46 (R^2 = 0.183) \quad (39)$$

$$0.5\text{m/s: } T_o = 0.243 T_i + 11.09 (R^2 = 0.776) \quad (40)$$

$$1.0\text{m/s: } T_o = 0.437 T_i + 7.357 (R^2 = 0.899) \quad (41)$$

$$2.0\text{m/s: } T_o = 0.612 T_i + 4.552 (R^2 = 0.946) \quad (42)$$

- 튜브길이 200m에서

$$0.1\text{m/s: } T_o = 0.037 T_i + 17.77 (R^2 = 0.081) \quad (43)$$

$$0.5\text{m/s: } T_o = 0.154 T_i + 13.22 (R^2 = 0.616) \quad (44)$$

$$1.0\text{m/s: } T_o = 0.331 T_i + 9.238 (R^2 = 0.832) \quad (45)$$

$$2.0\text{m/s: } T_o = 0.518 T_i + 5.900 (R^2 = 0.908) \quad (46)$$

5. 외기온도와 출구온도의 관계

위에서 언급한 바와 같이 각 튜브길이 및 풍속별로 외기온도와 출구온도의 상관관계는 아래에 나타낸 바와 같이 1차함수로 나타낼 수 있다.

$$T_o = A T_i + B \quad (47)$$

식 (47)에서 풍속이 증가하면 기울기 A는 증가하고 절편 B는 감소하는 것을 알 수 있다. 각 튜브길이별 기울기 A, 절편 B와 풍속과의 관계를 분석한 결과를 Fig.12~13에 나타내었다.

단, 풍속 0.1m/s의 경우 튜브길이 150m이상에서 외기온도와 출구온도의 상관관계가 매우 낮게 나타났으므로 계산범위에서 제외하였다. 그림에 나타낸 바와 같이 기울기 A와 풍속과의 상관관계는 0.929 이상으로 높게 나타났으며 절편 B와 풍속과의 상관관계도 0.895 이상으로 높게 나타났다. 추정식의 결정계수도

0.986이상으로 높게 나타났다. 하절기 및 동절기의 출구온도 추정식을 식(48)~(55)까지 나타내었다. 하절기 본 시스템의 출구온도 추정식을 아래에 나타내었다.

튜브길이 50m에서 출구온도 추정식 :

$$T_o = A_{50} T_i + B_{50} \quad (48)$$

$$A_{50} = 0.182 \ln(V) + 0.746 (R^2 = 0.998)$$

$$B_{50} = -4.04 \ln(V) + 6.128 (R^2 = 0.997)$$

튜브길이 100m에서 출구온도 추정식 :

$$T_o = A_{100} T_i + B_{100} \quad (49)$$

$$A_{100} = 0.195 \ln(V) + 0.553 (R^2 = 0.986)$$

$$B_{100} = -4.671 \ln(V) + 10.55 (R^2 = 0.987)$$

튜브길이 150m에서 출구온도 추정식 :

$$T_o = A_{150} T_i + B_{150} (\text{단, } V > 0.1\text{m/s}) \quad (50)$$

$$A_{150} = 0.259 \ln(V) + 0.414 (R^2 = 0.999)$$

$$B_{150} = -6.19 \ln(V) + 13.93 (R^2 = 0.999)$$

튜브길이 200m에서 출구온도 추정식 :

$$T_o = A_{200} T_i + B_{200} (\text{단, } V > 0.1\text{m/s}) \quad (51)$$

$$A_{200} = 0.249 \ln(V) + 0.321 (R^2 = 0.999)$$

$$B_{150} = -6.04 \ln(V) + 16.23 (R^2 = 0.999)$$

동절기 본 시스템의 출구온도 추정식을 아래에 나타내었다.

$$-50\text{m: } T_o = A_{50} T_i + B_{50} \quad (52)$$

$$A_{50} = 0.170 \ln(V) + 0.752 (R^2 = 0.996)$$

$$B_{50} = -2.44 \ln(V) + 2.855 (R^2 = 0.991)$$

$$-100\text{m: } T_o = A_{100} T_i + B_{100} \quad (53)$$

$$A_{100} = 0.199 \ln(V) + 0.570 (R^2 = 0.988)$$

$$B_{100} = -3.63 \ln(V) + 5.461 (R^2 = 0.997)$$

$$-150\text{m: } T_o = A_{150} T_i + B_{150} (\text{단, } V > 0.1\text{m/s}) \quad (54)$$

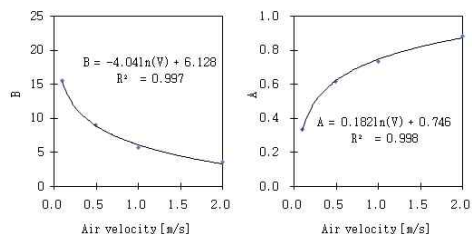
$$A_{150} = 0.266 \ln(V) + 0.430 (R^2 = 0.999)$$

$$B_{150} = -4.71 \ln(V) + 7.666 (R^2 = 0.993)$$

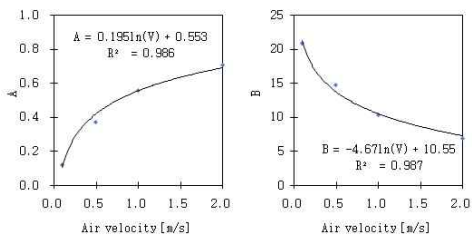
$$-200\text{m}: T_o = A_{200} T_i + B_{200} (\text{단, } V > 0.1\text{m/s}) \quad (55)$$

$$A_{200} = 0.262 \ln(V) + 0.334 (R^2 = 0.999)$$

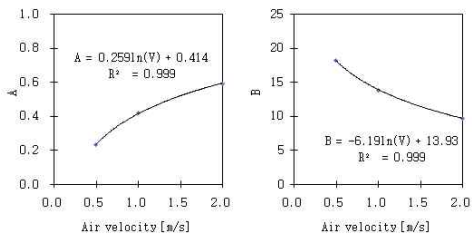
$$B_{150} = -5.28 \ln(V) + 9.452 (R^2 = 0.997)$$



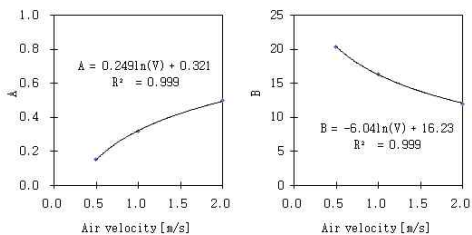
(a) 50m



(b) 100m

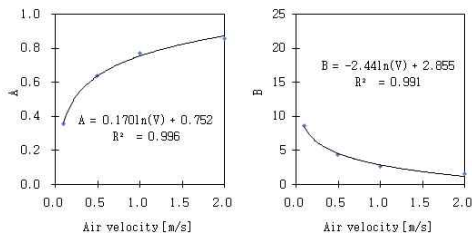


(c) 150m

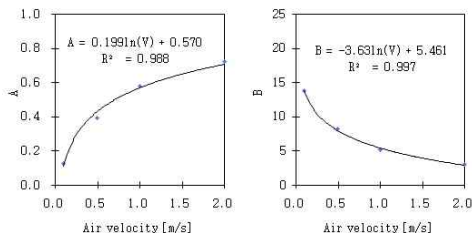


(d) 200m

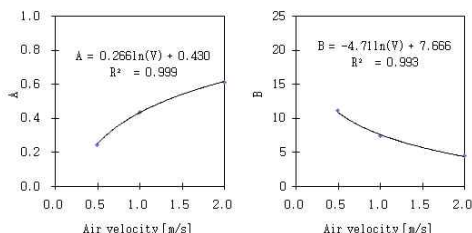
Fig. 12. In summer.



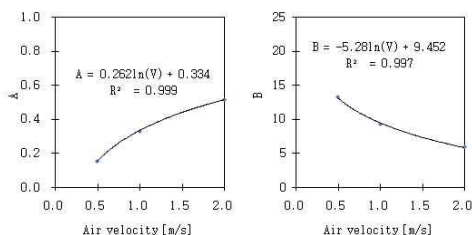
(a) 50m



(b) 100m



(c) 150m



(d) 200m

Fig. 13. In winter.

6. 수치해석과 추정식의 오차

열수분 동시이동 방정식에 의한 2차원 수치 해석 모델에 의한 계산값과 위에서 기술한 추정식에 값과의 오차를 Fig. 14~17에 나타내었다. Fig. 14의 튜브길이 50m에서 하절기 동안

의 각 풍속별 평균오차범위는 0.43~0.60으로 나타났으며, 표준편차는 0.27~0.42로 나타났다. 최대오차는 풍속0.1m/s일 때 2.14, 0.5m/s일 때 2.49, 1.0m/s일 때 2.14, 2.0m/s일 때 2.18로 나타났다. 동절기 동안의 각 풍속별 평균오차범위는 0.37~0.56로 나타났으며, 표준편차는 0.32~0.47로 나타났다. 최대오차는 풍속0.1m/s일 때 3.11, 0.5m/s일 때 2.08, 1.0m/s일 때 1.68, 2.0m/s일 때 1.88로 나타났다. 튜브길이 50m에서는 온도변화 경향이나 출구온도가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

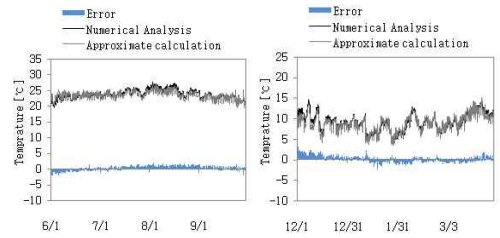
Fig. 15의 튜브길이 100m에서 하절기 동안의 각 풍속별 평균오차범위는 0.40~0.53로 나타났으며, 표준편차는 0.28~0.39로 나타났다. 최대오차는 풍속0.1m/s일 때 2.11, 0.5m/s일 때 2.69, 1.0m/s일 때 2.54, 2.0m/s일 때 2.34로 나타났다. 동절기 동안의 각 풍속별 평균오차범위는 0.31~0.54로 나타났으며, 표준편차는 0.41~0.73로 나타났다.

최대오차는 풍속0.1m/s일 때 3.27, 0.5m/s일 때 3.73, 1.0m/s일 때 2.55, 2.0m/s일 때 2.43로 나타났다.

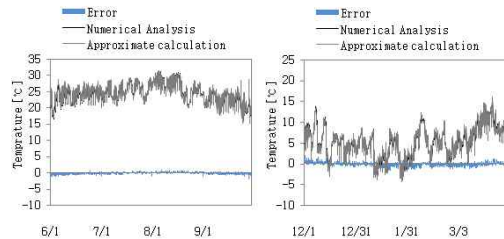
튜브길이 100m에서는 풍속 0.1m/s에서 약간의 오차는 있었으나 온도변화 경향과 출구온도가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 16의 튜브길이 150m에서 하절기 각 풍속별 평균오차범위는 0.50~0.92로 나타났으며, 표준편차는 0.37~0.71로 나타났다. 최대오차는 풍속 0.1m/s일 때 3.20, 0.5m/s일 때 2.19, 1.0m/s일 때 2.57, 2.0m/s일 때 3.61로 나타났다. 동절기 각 풍속별 평균오차범위는 0.29~1.93로 나타났으며, 표준편차는 0.49~1.23로 나타났다. 최대오차는 풍속0.1m/s일 때 5.74, 0.5m/s일 때 3.93, 1.0m/s일 때 3.28, 2.0m/s일 때 3.29로 나타났다.

풍속이 0.1m/s 경우 평균오차범위, 표준편차 및 최대오차가 크게 나타난 것은 위에서 언급한 바와 같이 열교환 할 대상 풍량이 작아 외기온도가 토양온도에 수렴하여 외기온도와 출구온도의 상관관계가 낮아졌기 때문인 것으로

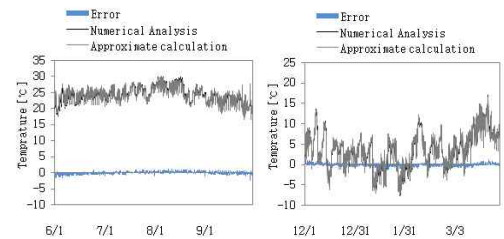
사료된다.



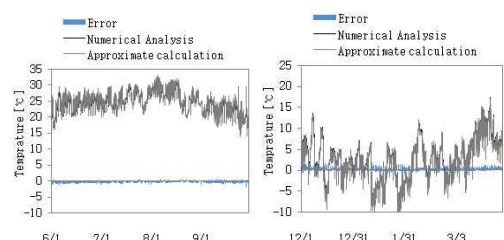
(a) Summer season(0.1m/s) (b) Winter season(0.1m/s)



(c) Summer season(0.5m/s) (d) Winter season(0.5m/s)



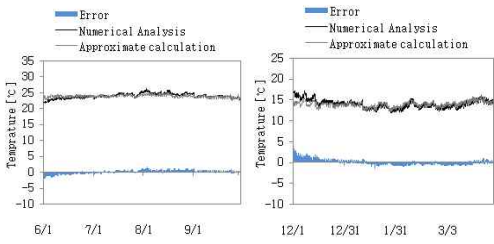
(e) Summer season(1.0m/s) (f) Winter season(1.0m/s)



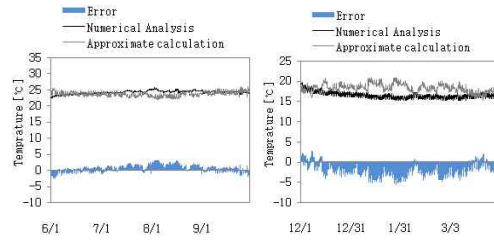
(g) Summer season(2.0m/s) (h) Winter season(2.0m/s)

Fig. 14. The error of numerical analysis and approximate calculation at 50m per each velocity.

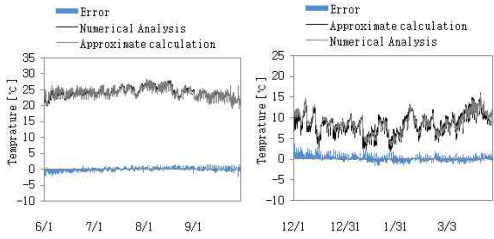
튜브길이 150m에서는 풍속 0.1m/s의 경우를 제외하면 온도변화 경향이나 출구온도가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.



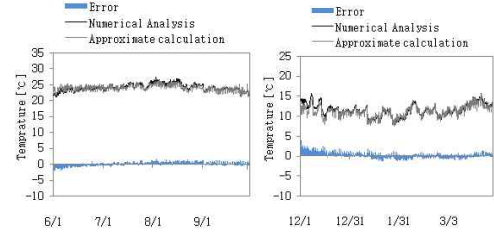
(a) Summer season(0.1m/s) (b) Winter season(0.1m/s)



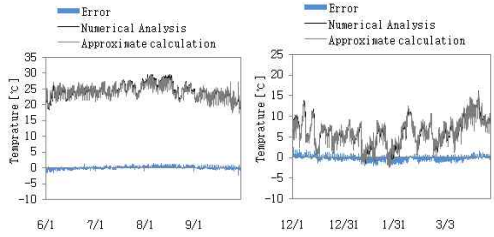
(a) Summer season(0.1m/s) (b) Winter season(0.1m/s)



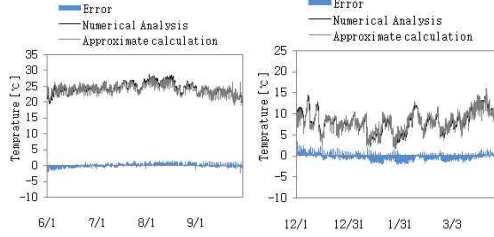
(c) Summer season(0.5m/s) (d) Winter season(0.5m/s)



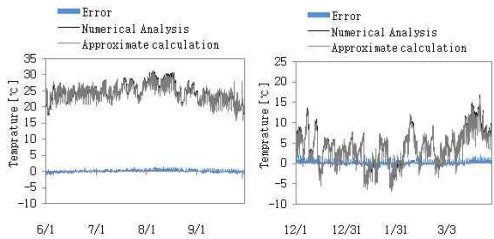
(c) Summer season(0.5m/s) (d) Winter season(0.5m/s)



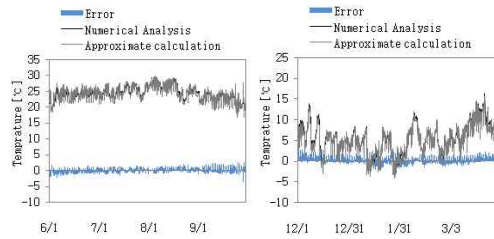
(e) Summer season(1.0m/s) (f) Winter season(1.0m/s)



(e) Summer season(1.0m/s) (f) Winter season(1.0m/s)



(g) Summer season(2.0m/s) (h) Winter season(2.0m/s)



(g) Summer season(2.0m/s) (h) Winter season(2.0m/s)

Fig. 15. The error of numerical analysis and approximate calculation at 100m per each velocity.

Fig. 16. The error of numerical analysis and approximate calculation at 150m per each velocity.

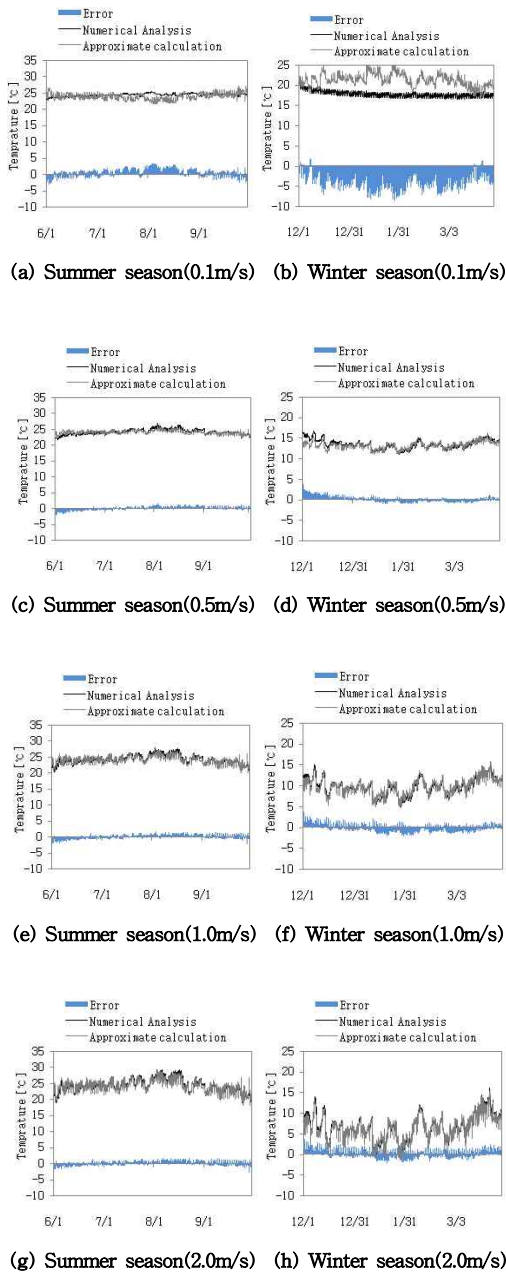


Fig. 17. The error of numerical analysis and approximate calculation at 200m per each velocity.

Fig. 17의 튜브길이 200m에서 하절기 각 풍속별 평균오차범위는 0.47~1.02로 나타났으며, 표준편차는 0.35~0.75로 나타났다. 최대오차는 풍속0.1m/s일 때 3.47, 0.5m/s일 때 2.13, 1.0m/s일 때 2.39, 2.0m/s일 때 3.01로 나

타났다. 동절기 각 풍속별 평균오차범위는 0.22~3.47로 나타났으며, 표준편차는 0.47~1.79로 나타났다. 최대오차는 풍속0.1m/s일 때 8.59, 0.5m/s일 때 3.82, 1.0m/s일 때 3.73, 2.0m/s일 때 3.78로 나타났다.

튜브길이 200m에서도 150m와 같이 풍속 0.1m/s의 경우 오차가 크게 나타났으나 이외 풍속에서는 온도변화 경향이나 출구온도가 비교적 잘 일치 하는 것으로 나타났다.

7. 결론

본 논문에서는 지열(地熱)을 이용한 외기부하 저감시스템의 냉각 및 가열효과를 추정하기 위한 간이추정식을 제안하고, 2차원 열수분 동시이동 방정식에 의한 비선형 수치해석 모델의 계산값과의 비교를 통해 그 타당성을 확인하였다. 그 결과, 간이추정식에 의한 본 시스템의 출구온도 예측 결과부터 풍속이 낮은 경우 (0.1m/s)를 제외하면 추정식에 의한 본 시스템의 출구온도 계산값은 약간의 오차는 있으나 외기온도 변화에 따른 출구온도 변화 경향 및 출구온도가 비선형 수치해석모델의 계산값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

따라서 계산시간과 작업의 간략화를 고려한다면 실제 실무에서 설계용 추정법으로 충분히 유효하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다는 결론을 얻었다.

[기호설명]

- c : 비열 [$J/m^3 \cdot K$]
- c' : 공극율 [m^3/m^3]
- H : 피트의 높이 [m]
- P : 포화수증기압 [Pa]
- P_{SV} : 수증기압 [Pa]
- T : 온도 [$^{\circ}C$]
- t : 시간 [s]
- V : 풍속 [m/sec.]
- X : 절대습도 [kg/kg D.A.]
- x : 길이 [m]
- y : 깊이 [m]

[그리스 문자]

- α : 대류 열전달률 [$W/m^2 K$]
- α_r : 실내의 열전달률 [$W/m^2 K$]
- α' : 복사율
- θ : 함수율 [kg/kg]
- κ : $\rho_w \partial \theta / \partial X$ [$kg/m^3(kg/kg.D.A.)$]
- λ : 열전도율 [$W/m K$]
- λ' : 수분확산율 [$kg/mh(kg/kg.D.A.)$]
- v : $\rho_w \partial \theta / \partial T$ [kg/m^3]
- ρ : 공기의 밀도 [kg/m^3]
- ϕ : 상대습도 [%]

[하첨자]

- a* : 공기
- c* : 지하피트 콘크리트
- cu, cd* : 지하피트 상부, 하부 콘크리트
- o* : 출구온도
- i* : 외기온도(입구온도)
- s* : 토양

참 고 문 헌

1) Son, W. T., Tanaka, H., Nagai, H., Okumiya, M. and Nakahara, N., A study on fresh air load reduction system by using heat exchange with earth, Transactions of the society of heating, air-conditioning and sanitary engineers of JAPAN, No. 87, pp.69-77. (2002)

2) Son, W. T., Tanaka, H. and Okumiya, M., Study on fresh air load reduction system by air-to-earth heat exchange using underground double floor space, Journal of asian architecture and building engineering, Vol.2, No.1, pp.41-48. (2003)

3) Son, W. T. and Nagai, H., Reducing Effect of Fresh Air Latent Heat Load in Air to Earth Heat Exchange using Underground Double Floor Space, Journal of asian architecture and building engineering, Vol.3, No.2, pp.253-258. (2004)

4) Son, W.T., Nagai, H. and Okumiya, M., Part 7: The examination condensation in the earth-tube, Summaries of technical papers of annual meeting architectural institute of JAPAN, pp.437-438. (1999)

5) Hokoi, S., Matsumoto, M. and Niwa, K. An analysis of stochastic properties of indoor air temperature, humidity and heating load of building intermittently air-conditioned. Minutes and Proceeding of W40 Meeting in Kyoto, Japan. pp.364-373. (1997)

(접수:2010.06.17, 수정:2010.08.14, 게재 확정:2010.08.20)