

지열을 이용한 공조외기부하저감 시스템에 관한 연구

- 지하피트 공간 내의 개구부 형상에 시스템의 열적 특성 및 기류성상에 미치는 영향 -

손 원 득[†], 이 성^{*}

일본 三重대학교 공동벤처연구기관, *동의대학교 빌딩시스템공학과

Study on Fresh Air Load Reduction System by Using Geothermal Energy
- Effect on Thermal Characteristic and Air Pattern of System by Opening Configuration -

Won-Tug Son[†], Sung Lee^{*}

Satellite Venture Business Laboratory, Mie University, Tsu 514-0012, Japan

*Department of Building System Engineering, Dong-Eui University, Pusan 614-714, Korea

(Received July 30, 2004; revision received October 18, 2004)

ABSTRACT: This paper presents the effect of opening configuration on the thermal behavior and air pattern of earth tube system. The earth tube system is a fresh air load reduction system by using underground double floor space for air-conditioning. In order to analyze the effect of opening configuration on thermal performance of this system and air pattern in underground double floor space quantitatively, we used a model dealing with three-dimensional profile of wind velocity and temperature in underground double floor space. In conclusion, it is confirmed that heat exchange of a fresh air is mainly performed with upper and lower wall in underground double floor space, and that heat exchange area increased by installing the opening near the wall.

Key words: Heating surface area(전열면적), Underground double floor space(지하이중슬래브), Opening(개구부), Fresh air load(외기부하)

기 호 설 명

C_c : 비열 [J/kg·K]

C_1 : 모델정수(1.59) [-]

C_2 : 모델정수(0.18) [-]

C_μ : 모델정수(0.09) [-]

k : 난류에너지 [m^2/S^2]

T : 온도 [°C]

t : 시간 [s]

U : 순간풍속의 주류방향 성분 [m/s]

V : 순간풍속의 주류직각방향 성분 [m/s]

W : 순간풍속의 수직방향 성분 [m/s]

x : 공간좌표의 주류방향 성분 [m]

y : 공간좌표의 주류직각방향 성분 [m]

z : 공간좌표의 수직방향 성분 [m]

그리스 문자

λ : 열전도율 [W/m·K]

ρ_c : 밀도 [kg/m^3]

[†] Corresponding author

Tel.: +81-59-231-9446; fax: +81-59-231-9452

E-mail address: sonwt@bbzone.net

- ϵ : 난류에너지 소실률 [m^2/S^3]
 σ_k : 모델정수(1.0) [-]
 σ_ϵ : 모델정수(1.3) [-]
 ν : 분자 동점성계수 [m^2/s]
 ν_t : 와류 동점성계수 [m^2/s]

1. 서 론

지구환경문제 및 자원고갈문제를 해결하기 위해 세계 각국에서는 자연에너지 및 미활용에너지를 사용한 에너지 절약기술에 큰 관심을 가지게 되었다. 이러한 관점에서 건물의 외기부하를 저감하기 위해 자연에너지를 이용하는 것은 에너지 절약에 공헌한다고 말할 수 있다.

외기부하를 저감하기 위해 외기를 가열 및 냉각하는 자연에너지원으로서, 연중 외기와 온도차를 얻을 수 있는 하천수 및 해수와 같은 수열원과 토양열원 등이 알려져 있다. 이러한 자연에너지원들 중 무한한 열용량을 갖고 있으며, 축열성이 높고 장소에 상관없이 비교적 용이하게 이용할 수 있는 것은 토양이다.

토양축열의 일반적인 수법으로서는 토양축열 히트펌프, 쿨튜브 및 온실의 축열덕트 등이 있다. 쿨튜브는 지중 매설관에 공기를 도입해서, 토양과 열교환에 의해 도입공기의 냉각 및 가열 효과를 기대하는 시스템이다. 이 시스템에 대해서는 지금까지 실측, 해석모델의 개발 및 도입외기의 냉각 및 가열 효과 등의 검토가 많이 이루어져 있다.

국내에서는 Lee et al.의 연구⁽¹⁾에서 축열냉각, 쿨튜브와 할로우 코어를 병행하는 방식에 대해 연간 냉방에너지 소비량과 냉방에너지 비용을 비교 분석함으로써 구조체의 축열성능을 이용한 효과적인 냉방에너지 저감방안을 제안하였다. Park의 연구⁽²⁾에서는 쿨튜브를 이용한 자연 냉방시스템의 열 및 습기전달에 대해 수치계산모델을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 국외에서는 Zhang and Ishihara⁽³⁾에 의한 쿨튜브의 출구온도, 제거열량 및 지중온도에 관한 수치해석을 하였다. Kimura et al.⁽⁴⁾은 쿨튜브를 설치한 주택을 이용한 실험 및 시뮬레이션을 통해 실내 온습도에 관해서 검토하였다. 이러한 연구에서는 지중에 외기도입용관을 매설하여, 도입외기를 냉각 및 가열하는 시

스템을 대상으로 하고 있다. 이러한 방식은 건물 조건 및 주거인원수에 따라 매설 관의 단면적을 변화시켜 관내 풍속의 변화가 가능하다. 또한 시스템의 성능을 향상시키기 위해 관의 길이나 매설 깊이를 조절이 가능하나, 초기 설치비가 증가하는 단점이 있다. 이에 반해 건물 지하피트를 이용하는 방식은 외기도입용 지하피트의 조건이 고정되어 있어 매설 깊이 등의 조절이 불가능하지만 쿨튜브처럼 지중 매설관을 설치하지 않고 내진용으로 설계된 지하피트를 이용하므로 초기 설치비용을 절감할 수 있다. 이러한 건물 지하피트를 이용한 방식에 관한 연구는 국내외를 막론하고 거의 찾아볼 수 없는 실정이다.

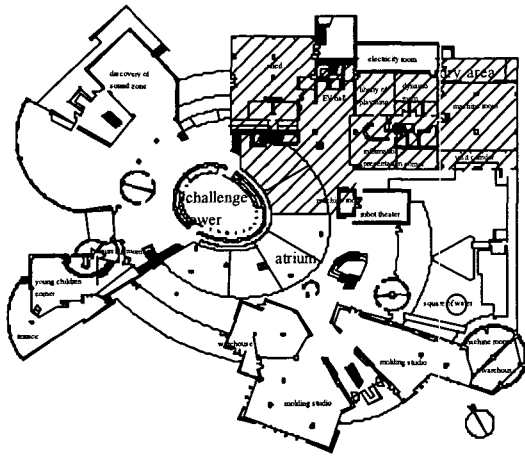
따라서 지금까지 본 연구⁽⁵⁾에서는 송풍용 팬에 의해 외기를 건물지하 이중 슬래브에 도입해서, 그 내부의 지중벽에 설치된 개구부를 통과시켜 실내에 취출하는 과정에서 주변구체(토양)와의 열교환에 의해 하기에는 외기를 냉각시키고 동기에는 가열시켜 외기의 현열부하를 저감시키는 시스템(이하 어스튜브 시스템)을 대상으로 온습도 실측결과 및 수치해석을 이용하여 외기의 현열 및 잠열부하 저감효과에 관해 검토한 결과, 외기의 현열부하는 유효하게 저감되나 일반적인 기상조건에 있어서 잠열부하의 저감효과는 거의 없음을 확인하였다.

한편, 지금까지의 수치해석에 의한 성능예측방법은 설계라는 관점에서 실상은 난류인 피트 내의 기류성상을 단순한 층류로 가정하여 성능예측을 하였으나, 피트 내의 열교환은 피트 내의 벽체와의 열전달에 의해 이루어지기 때문에, 지하피트 내의 지중벽에 설치되어져 있는 개구부의 크기, 위치 및 간격에 따라 시스템의 열성능이 변화할 가능성이 존재한다.

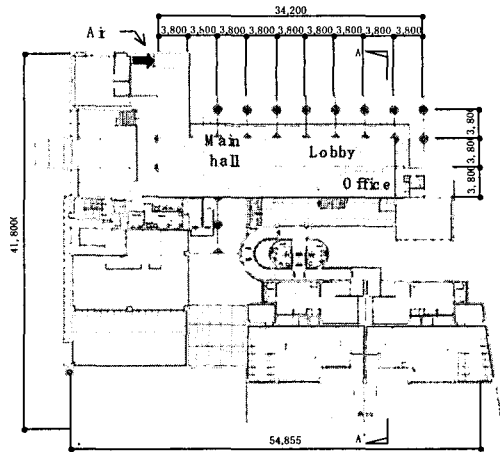
본 논문에서는 3차원 열 및 기류 해석을 통하여 본 시스템이 도입된 실제 건물을 대상으로 도입외기와 주변구체(토양) 간의 열교환 특성을 명확히 하고 개구부 형상에 따른 전열면적의 변화를 정량적으로 파악하고자 한다.

2. 본 시스템 및 지하피트의 개요

본 논문에서는 어스튜브 시스템이 도입된 일본 아이치켄에 소재한 아동복지시설(이하 A시설)과 일본 코치켄에 소재한 온천숙박시설(이하 K시설)



(a) 1st floor plan of A building



(b) 1st floor plan of K building

Fig. 1 Buildings for examination (Hatched area represents underground pit used for this system).

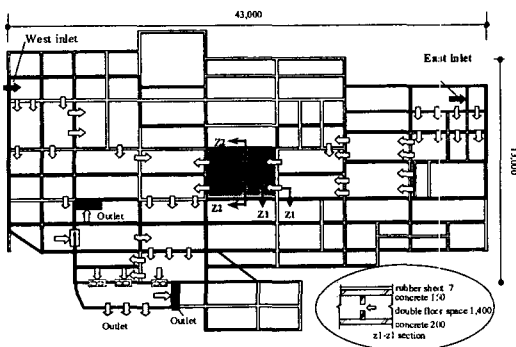
Table 1 Geometry underground pit in each building

	A building	K building
Air volume	6400 CMH	2500 CMH
Length of Earth tube	50 m	80 m
Heating surface area	840 m ²	768 m ²
Sectional form of Earth tube	Width: 7.0 m, Height: 1.4 m	Width: 3.8 m, Height: 1.0 m
Sectional form of opening	Width: 0.7 m, Height: 0.4 m	Width: 0.5 m, Height: 0.5 m
Air velocity in Earth tube	0.18 m/s	0.18 m/s
Air velocity in opening	3.2 m/s	1.4 m/s

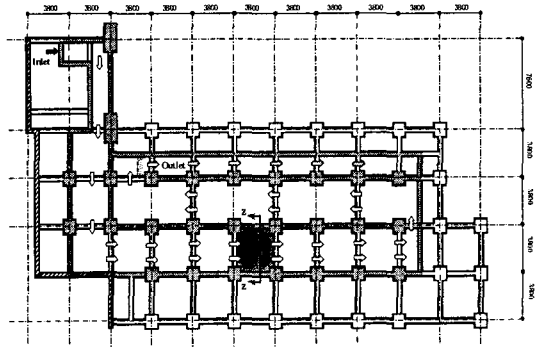
을 대상으로 하였다.

A 시설은 1996년 7월에 준공 및 개관되었으며, 자연과 조화를 컨셉으로 실내 온열환경을 엄격히

구속하지 않고 자연에 가까운 실내환경을 추구하였다. 어스튜브 시스템이 도입되어진 지하 이중 슬래브는 Fig.1(a)에 사선으로 표시한 관리동의

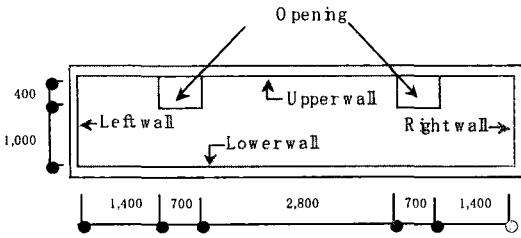


(a) Diagram of the under floor in A building

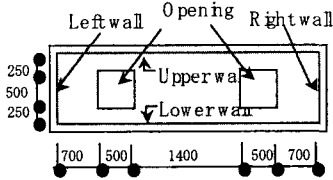


(b) Diagram of the under floor in K building

Fig. 2 Diagram of the under floor in each building.



(a) Section of underground pit A building



(b) Section of underground pit K building

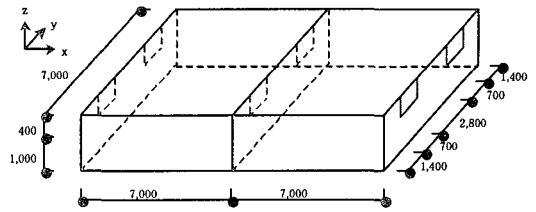
Fig. 3 Section of underground pit in each building.

지하피트 공간이며, 외기는 관리동 동측과 서측의 도입구로부터 흡입된다. 외기도입용 팬은 4대가 설치되어 있으며, 휴관일을 제외하고 8:00~17:00까지 중앙감시시스템에 의해 제어된다.

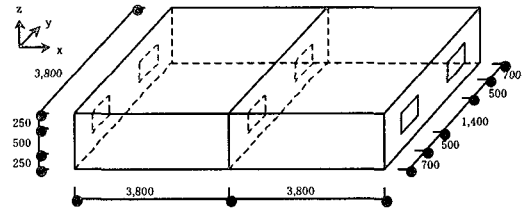
K시설은 2002년 8월에 준공되었으며, 어스튜브 시스템은 메인 흡을 대상으로 외기를 냉각 및 가열하여 도입한다. 이 공간은 이용자의 통로 및 로비로서 이용되기 때문에 A시설과 같이 실내 열환경을 엄격히 구속하지 않으며 본 시스템에 의해 냉각 및 가열된 외기를 통한 패시브 공조를 추구한다. 어스튜브 시스템이 도입된 지하피트는 Fig. 1(b)에 사선으로 표시한 메인 흡의 지하 이중 슬래브 공간이며, 외기는 건물 북측 외부계단 하부에 설치된 도입구로부터 흡입된다. 송풍팬은 2대가 설치되어 있으며, 연중 24시간 운전된다. A시설과 K시설에 본 시스템이 도입된 지하피트의 개략도를 Fig. 2에, 지중벽에 설치되어 있는 개구부의 형상을 Fig. 3에, 본 시스템의 개요를 Table 1에 각각 나타내었다. A시설과 K시설의 외기도입량은 각각 6400 CMH와 2500 CMH이며, 지하 피트의 단면적은 각각 9.8m²과 3.8m²이며, 지하 피트 내의 평균 풍속은 약 0.18m/s로 동일하다.

3. 수치계산의 개요

토양을 포함한 지하피트 전체를 대상으로 한 3차원 열 및 유체해석에는 많은 계산시간을 필요



(a) Object for calculation in A building



(b) Object for calculation in K building

Fig. 4 Object of underground pit for calculation.

로 하기 때문에, 수치계산은 지하피트 공간의 일부분만을 대상으로 하였다(Fig. 4 참조). A시설을 대상으로 한 격자분할은 280(x)×140(y)×28(z)로 하고, K시설의 격자분할은 152(x)×76(y)×20(z)로 하였다. A시설과 K시설의 지하피트의 개구부의 면적은 0.56m²(0.28m²×2개)과 0.5m²(0.25m²×2개)로 실제조건과 동일하게 설정하였고, 개구부의 평균 면풍속은 3.2m/s와 1.4m/s로 설정하였다. 또한 각각의 건물에 대해 개구부의 위치를 상하 벽면 및 좌우 벽면에 근접하게 변경 설치한 경우의 계산은 격자분할 수, 개구부 면적 및 평균면풍속에 대해 위에서 기술한 실제조건과 동일하게 설정하였다. 지하피트의 벽면경계온도는 20℃ 일정으로, 입구공기의 온도는 10℃로 설정하여 중심차분법에 의한 열전도방정식을 이용하여 계산하였다.

난류모델은 표준 k-ε 난류모델을, 이류항의 차분법은 QUICK법을 이용한 비압축·비등온의 정상해석을 하였다. 이러한 계산조건을 바탕으로 한 지하피트 공간의 3차원 열 및 표준 k-ε 난류모델

Table 2 Thermal property used for simulation

	Volumetric specific heat [kJ/m ³ ·K]	Thermal conductivity [W/m·K]
Concrete	1887.9	1.40
Air	1.21	-

방정식을 이하에 나타내며, 계산에 사용된 각 재료의 열물성치를 Table 2에 나타낸다.

- 지하피트 벽체의 열평형방정식

$$c_c \rho_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \lambda_c \left(\frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

- 표준 k-ε 난류모델방정식

· 난류에너지 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(kU) + \frac{\partial}{\partial y}(kV) + \frac{\partial}{\partial z}(kW) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_k \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_k \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_k \frac{\partial k}{\partial z} \right) \\ + \nu_t S - \epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

단 S, ν_t, ν_k는,

$$\begin{aligned} S = 2 \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 \right\} \\ + \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \\ + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \\ + 2 \left(\frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial z} \frac{\partial W}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

$$\nu_k = \frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \quad (5)$$

· 난류에너지 소산율방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon}{\partial x} U + \frac{\partial \epsilon}{\partial y} V + \frac{\partial \epsilon}{\partial z} W = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \\ + C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t S - C_2 \frac{k \epsilon}{\nu_t} \end{aligned} \quad (6)$$

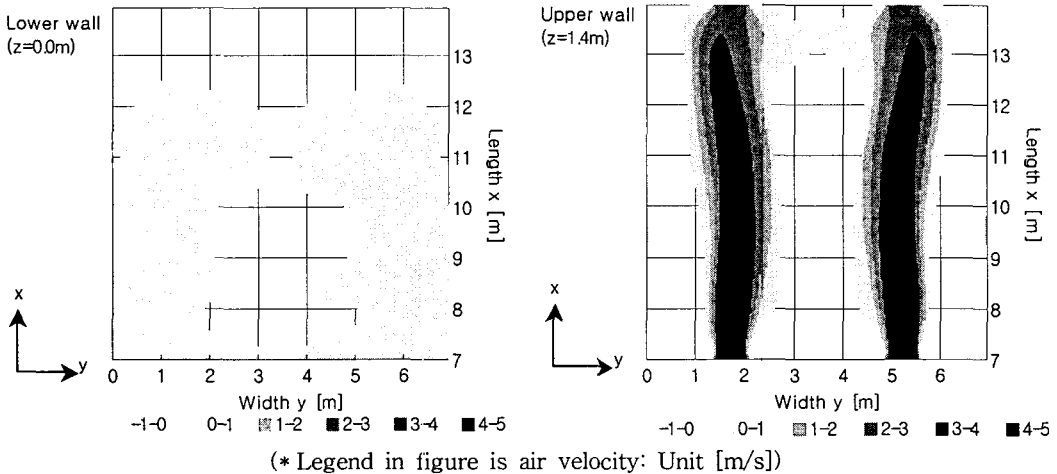
단 ν_ε는,

$$\nu_\epsilon = \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} + \nu \quad (7)$$

4. A시설의 지하피트 내의 기류성상

Fig. 5에 어스튜브 길이방향 7m 지점을 원점으로 한 x-y 단면의 상하 벽체의 기류분포를 나타내었고, Fig. 6에 길이방향 7m 지점을 원점으로 한 x-z 단면의 좌우 측면과 길이방향 10.5m의 z-y 단면의 기류분포를 나타내었다.

그림으로부터 지하피트의 평균 풍속 0.18m/s



(a) Air pattern of lower wall in A building (b) air pattern of upper wall in A building

Fig. 5 air pattern of lower and upper wall in the present condition of A building.

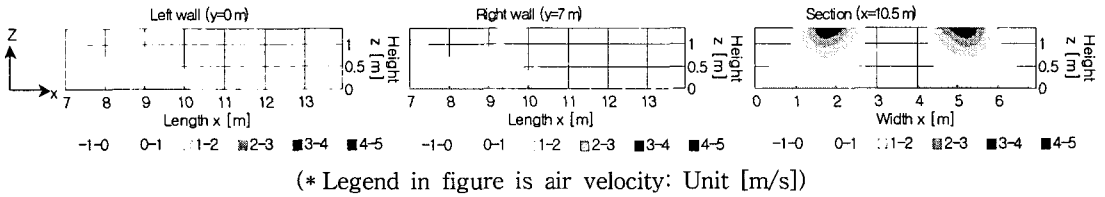


Fig. 6 Air pattern of left, right and section wall in underground pit in a real condition of A building.

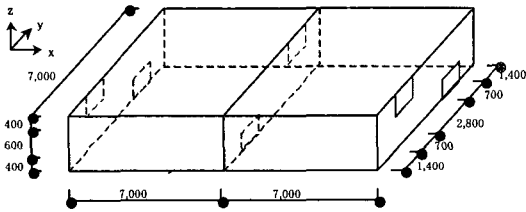


Fig. 7 Object of underground pit for calculation of A building after change of opening position.

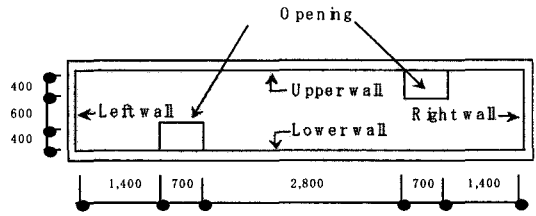
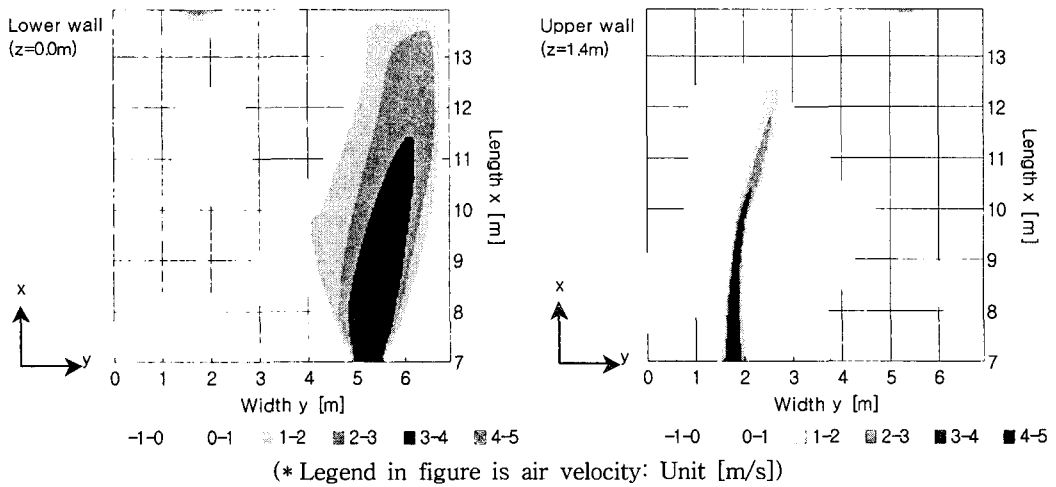


Fig. 8 Section of underground pit for calculation of A building after change of opening position.



(a) Air pattern of lower wall in A building (b) air pattern of upper wall in A building

Fig. 9 Air pattern of lower and upper wall after change of opening position in A building.

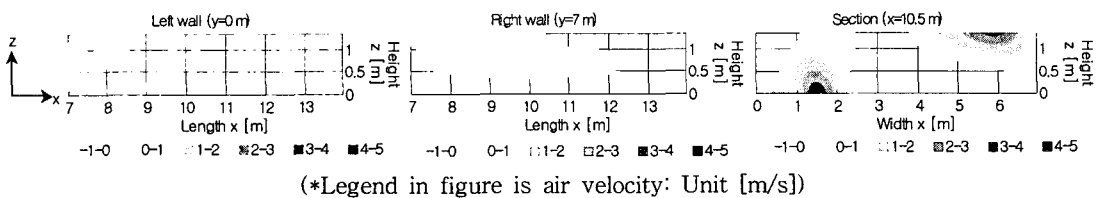


Fig. 10 Air pattern of left, right and section wall after change of opening position in A building.

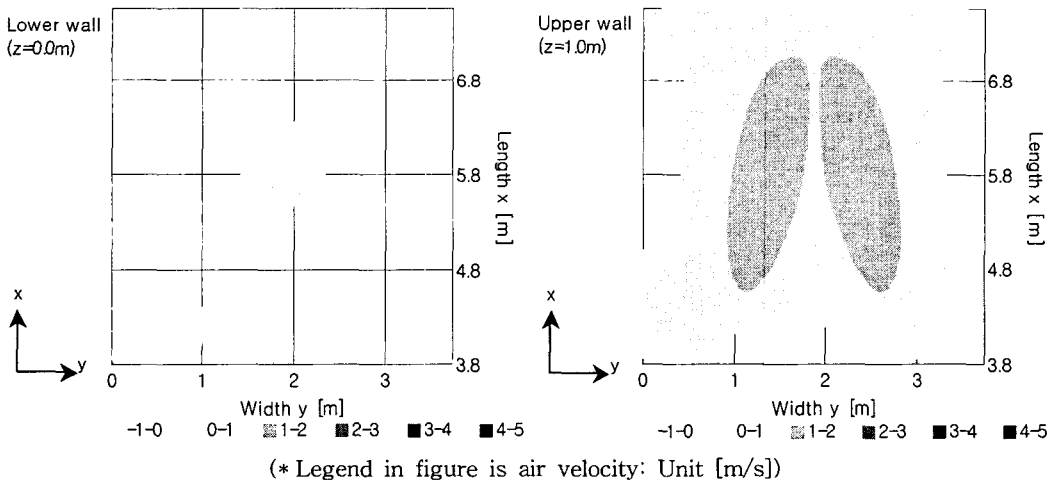
에 대해 지하피트 상하 벽체의 평균 풍속은 1.1 m/s, 좌우측 벽면 풍속은 0.11 m/s로 나타났다. 또한 지하피트 상하 벽면과 좌우측 벽면이 도입 외기에 대한 전열면으로 이용되는 면적은 지하피트 벽면면적에 대해서 각각 약 38.1%와 2.8%로 나타났으며, 10℃의 입구공기온도에 대해서 출구 공기온도와 지하피트 내의 평균 온도는 13.2℃와 13.5℃로, 그 온도차는 0.3℃로 나타났다.

여기서, 지하피트의 벽면을 전열면적으로서 이용하는 면적을 증가시키기 위해, 출입구 개구부의 위치를 Fig. 7, 8과 같이 변경한 조건에 대해서 검토를 하였다. Fig. 9에 개구부 위치 변경 후의 어스튜브 길이방향 7m 지점을 원점으로 한 x-y 단면의 상하 벽체의 기류분포를 나타내었고, Fig. 10에 길이방향 7m 지점을 원점으로 한 x-z 단면의 좌우 측면과 길이방향 10.5m의 z-y 단면의 기류분포를 나타내었다. 결과로부터, 지하피트 상하 벽면의 평균 풍속은 0.95 m/s로 개구부의 위치변경 후에도 변화는 거의 없었다. 한편 개구부

위치변경 후 좌우 측면의 평균 풍속은 0.31 m/s로, 변경 전과 비교해서 약 3배 정도 증가하였으며, 지하피트 상하 벽면과 좌우측 벽면이 외기 도입에 대한 전열면으로 이용되는 면적은 지하피트 벽면면적에 대해서 각각 39.4%와 4.5%로, 변경 전과 비교해 약간 증가하였으며, 개구부 위치변경 후의 출구공기온도는 13.6℃로 나타났으며, 변경 전보다 0.4℃ 상승하였다.

5. K시설의 지하피트 내의 기류성상

Fig. 11에 어스튜브 길이방향 3.8m 지점을 원점으로 한 x-y 단면의 상하 벽면의 기류분포를 나타내었고, Fig. 12에 길이방향 3.8m 지점을 원점으로 한 x-z 단면의 좌우 측면과 길이방향 5.7m에 대한 z-y 단면의 기류분포를 나타내었다. 그림으로부터, 지하피트 단면 평균 풍속 0.18 m/s에 대해, 지하피트 상하 벽면 평균 풍속은 0.39 m/s이었고, 좌우 측면 풍속은 0.14 m/s이었다. 그



(a) Air pattern of lower wall in K building (b) air pattern of upper wall in K building

Fig. 11 Air pattern of lower and upper wall in real condition of K building.

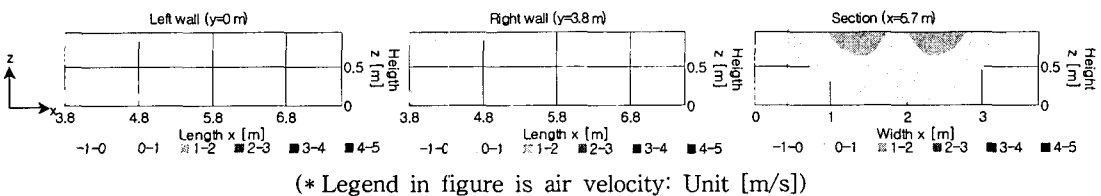


Fig. 12 Air pattern of left, right and section wall in underground pit in real condition of K building.

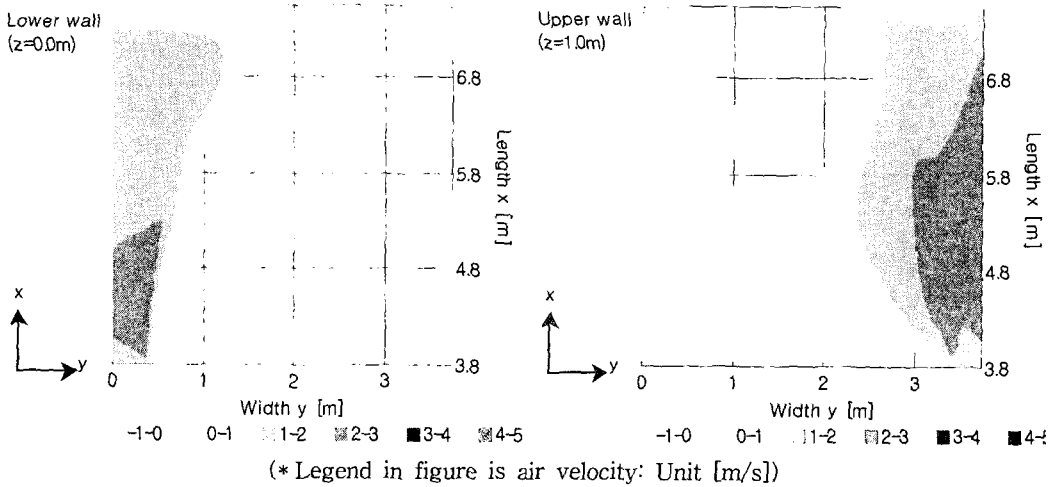


Fig. 13 Air pattern of lower and upper wall after change of opening position in K building.

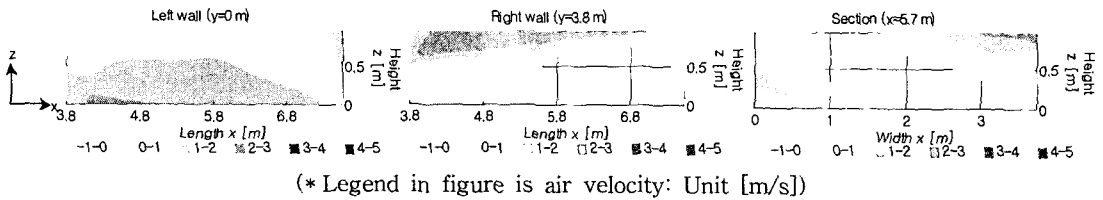


Fig. 14 Air pattern of left, right and section wall after change of opening position in K building.

리고, 도입외기에 대한 전열면으로 이용되는 면적은 지하피트 벽면면적에 대해서 각각 약 33.3%와 0.5%로 나타났으며, 10℃의 입구공기온도에 대해서 출구공기온도와 지하피트 내의 평균 온도는 12.3℃와 12.4℃이었고, 그 온도차는 0.1℃로 나타났다.

지하피트 단면면적에 대한 개구부 면적의 비율은 A시설(5.7%)보다 K시설(13.2%)이 컸음에도 불구하고, 전열면으로써 이용률이 A시설과 큰 차이가 없는 것은 A시설보다 K시설의 개구부 간격이 협소함으로 인해 지하피트 단면상 중앙부를 통과하는 기류가 증가했기 때문이라고 추측된다. K시설에 대해서도 A시설과 동일하게 출입구 개구부의 위치를 변경하여 계산한 결과, 지하피트의 전열면으로써의 이용률은 증가하였으나 계산조건상의 지하피트 전열면적이 작았기 때문에 변경 후의 출구 온도차는 크게 변화하지 않았다.

또한 Fig. 15에 나타낸 바와 같이 개구부의 위치를 좌우 측면에 근접하게 설치한 경우에 대해

서 검토를 하였다. Fig. 13에 개구부 위치를 Fig. 15와 같이 변경한 후의 어스튜브 길이방향 3.8m 지점을 원점으로 한 x-y 단면의 상하 벽면의 기류분포를 나타내었고, Fig. 14에 길이방향 3.8m 지점을 원점으로 한 x-z 단면의 좌우 측면과 길이방향 5.7m에 대한 z-y 단면의 기류분포를 나타내었다. 변경 후의 지하피트 상하 벽면의 평균 풍속은 1.08 m/s로, 변경 전과 비교해서 약 3배 증가하였으며, 좌우측 벽면의 평균 풍속은 0.97 m/s로, 변경 전과 비교해서 약 7배 증가하였고, 개구

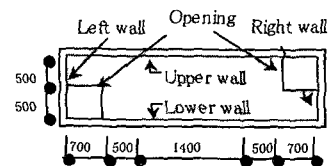


Fig. 15 Section of underground pit for calculation after change of opening position in K building.

부 위치를 변경한 후의 출구공기온도는 12.7℃로 나타났으며, 변경 전보다 약 0.4℃ 상승하였다.

이상의 결과로부터, K시설과 같이 지하피트 단면면적에 비해 개구부 면적의 비율이 비교적 큰 경우에도 출입구의 개구부 간격이 협소하게 설치된 경우에는 본 시스템은 도입외기에 대해 지하피트 상하 벽면을 중심으로 열교환이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 어스튜브 시스템이 도입된 실제 건물의 지하피트를 대상으로 개구부의 형상과 간격이 그 공간 내에서의 공기온도와 기류성상에 미치는 영향에 대해서 검토를 하였다.

(1) A시설의 경우, 지하피트 상하 벽면과 좌우 측 벽면이 도입외기에 대한 전열면으로 이용되는 면적은 지하피트 면적에 대해서 각각 약 38.1%와 2.8%로 나타났다. 또한 10℃의 입구공기온도에 대해 출구공기온도와 지하피트 내의 평균 온도는 각각 13.2℃, 13.5℃로 나타났으며, 그 온도차는 0.3℃로 나타났다.

(2) K시설의 경우, 지하피트 상하 벽면과 좌우 측 벽면이 도입외기에 대한 전열면으로 이용되는 면적은 지하피트 면적에 대해서 각각 약 33.3%와 0.5%로 나타났다. 또한 10℃의 입구공기온도에 대해 출구공기온도와 지하피트 내의 평균 온도는 각각 12.3℃, 12.4℃로 나타났으며, 그 온도차는 0.1℃로 나타났다.

(3) 검토대상인 A시설과 K시설은 도입외기에 대해서 지하피트 상부 벽면 및 하부 벽면과 대부분의 열교환이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 어스튜브 시스템으로 사용되는 지하피트의 벽면을 도입외기에 대한 전열면으로 이용되는 면적을 증가시키기 위해서, 출입구 개구부의 위치를 변경한 결과, 지하피트 벽면을 전열면으로 이용하는 면적은 지하피트 벽면면적에 대해서 변경 전과 비교해서, A시설의 경우는 약 3% 증가하였

고, K시설의 경우는 약 9% 증가하였다.

(5) 본 논문에서 검토한 결과는 벽체온도 및 유입공기온도가 일정한 정상상태로 가정한 검토 결과이기 때문에, 개구부 위치의 변경에 따른 열교환량의 증가는 일반적인 수치는 아니지만, 전열면적이 충분하지 않으며 피트형상이 비교적 협소한 경우 및 개구부의 위치를 측면 벽체에 근접하게 설치된 경우에는 종래의 2차원 예측법(상하 벽면만을 고려한 열교환)으로는 정도 높은 결과를 얻을 수 없으므로, 3차원성을 고려한 예측법을 사용할 필요가 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Lee, S. B., Kim, G. H. and Lee, M. K., 2002, A study on energy saving potential in multi-family residential complex using mass cooling effects, *Journal of AIK*, Vol. 18, No. 1, pp. 217-224.
2. Park, H. S., 1995, A study on heat and mass transfer of the natural cooling system using the underground energy, *Journal of AIK*, Vol. 11, No. 10, pp. 187-197.
3. Zhang, Q. and Ishihara, O., 1995, Discussion on the exit temperature and cooling energy of cooling tubes for design, *Transactions of AIJ*, No. 477, pp. 11-18.
4. Kimura, K., Maeda, K. and Onojima, H., 1983, Study on the passive cooling effects of cool tube, *Summaries of technical paper of annual meeting architectural institute of JAPAN*, pp. 675-678.
5. Son, W. T., Nagai, H. and Okumiya, M., 2001, Part 10: The examination on model taking account of hygroscopic concrete, *Summaries of technical papers of annual meeting architectural institute of JAPAN*, D-2, pp. 503-504.