

# 건물 기초를 이용한 지중열 공조시스템의 개발에 관한 연구 (2)

남 유 진<sup>†</sup>, 오오카 료조<sup>\*</sup>, 황 석 호, 세키네 켄타로<sup>\*\*</sup>, 시마와키 요스케<sup>\*</sup>

동경대학 대학원, <sup>\*</sup>동경대학 생산기술연구소, <sup>\*\*</sup>(주)타이세이 건설

## A Study on Development of a Ground-Source Heat Pump System Utilizing Pile Foundation of a Building

Yu-Jin Nam<sup>†</sup>, Ooka Ryojo<sup>\*</sup>, Suk-Ho Hwang, Kentaro Sekine<sup>\*\*</sup>, Yosuke Shimawaki<sup>\*</sup>

**ABSTRACT:** To purpose of this research is to develop the numerical model for simulating performance of ground heat exchanger with high prediction accuracy. This paper describes the development of a numerical model that simulates the heat transfer between ground and circulation water in ground heat exchanger. Furthermore, we propose the estimating technique of soil properties, such as thermal conductivity, heat capacity and hydraulic conductivity, based on ground investigation. Comparison between experiment and numerical analysis based on the model developed above was conducted under the condition of the experiment in 2004. The result of analysis agreed well with the experimental result.

**Key words:** Ground-source heat pump(지열히트펌프시스템), Cast-in-place concrete pile foundation(현장타설형 기초말뚝), Numerical simulation model(수치해석모델), Soil property(토양 물성)

### 기 호 설 명

- $C$  : 비열
- $h$  : 대류열전달계수 [ $W/m^2K$ ]
- $j$  : 열플럭스 [ $J/m^2/d$ ]
- $k$  : 침투 텐서(permeability tensor) [ $m^2$ ]
- $p$  : 압력 [kPa]
- $Q_p$  : 질량 발생량
- $Q_T$  : 에너지 발생량
- $T$  : 온도 [ $^{\circ}C$ ]
- $v$  : 속도 벡터 [m/s]
- $V_w$  : 유체유속[m/s]
- Pr : Prandtl 수,  $v_w/a$
- Re : Reynolds 수,  $2rV_w/v_w$

### 그리스 문자

- $\alpha$  : 온도전달율 [ $m^2/s$ ]
- $\epsilon$  : 체적비율 ( $0 \leq \epsilon_a \leq 1$ )
- $\mu$  : 점성계수 [kg/ms]
- $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]
- $\sigma$  : 슈테판볼츠만정수  $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2K^4]$
- $v_w$  : 유체의 동점성계수 [ $m^2/s$ ],

### 상첨자

- $\alpha$  : 고체상, 액상, 기체상

### 하첨자

<sup>†</sup> Corresponding author  
 Tel: +81-3-5452-6434;  
 Fax: +81-3-5452-6432  
 E-mail address: namyujin@iis.u-tokyo.ac.jp

- i, j : 오일러 공간좌표계의 지수
- $\alpha$  : 고체, 액체, 기체의 각 상
- w : 순환수

## 1. 서론

지중열 공조시스템의 보급 및 실용화를 위해서는 건물의 계획 단계 이전에 지중으로부터의 채·방열량을 정확하게 예측하여 사전에 시스템의 에너지 효율성 및 경제성을 평가하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 시스템의 특성은 물론 건축 부지의 기후 및 토양 특성을 반영한 시뮬레이션 수법이 요구된다. 이에 본 연구에서는, 지중의 열·수분이동 시뮬레이션 코드에 지중열교환기의 해석 모델을 추가함으로써, 범용성이 높고 정확도가 높은 채열량 예측모델을 구축하였다.

또한 수십만에서 수백만엔 단위의 열응답 테스트(Thermal Response Test)나 보링 테스트(Boring Test)등의 의한 지반 조사 방법을 이용하지 않고도 건물의 기초설계를 위한 지반조사 데이터를 이용하여 시뮬레이션에 필요한 토양의 열물성치를 파악할 수 있는 방법을 제안하였다.

개발한 시뮬레이션 수법과 토양 물성치의 추정 수법의 타당성 검증을 위해, 2004년도에 실시한 냉난방실험 데이터<sup>(1)</sup>를 이용해서 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교 검증하였다.

## 2. 채열량 예측 모델

### 2.1 지중열·수분이동 시뮬레이션 코드

본 연구에서는 지중열 수분 이동 시뮬레이션 코드로서 WASY사에서 개발한 FEFLOW를 사용하였다. 이 코드는 지하수의 흐름이나 토양오염의 해석에 이용되는 시뮬레이션 코드<sup>(2)</sup>로서, 지중의 열·물질이동에 관한 보존법칙으로 식 (1)~(3)(질량보존의 법칙, 운동량보존의 법칙, 에너지보존의 법칙)은 고체상, 액체상, 기체상의 각층에 대해 모두 성립한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha) = \epsilon_\alpha \rho^\alpha Q_i^\alpha \quad (1)$$

$$v_i^\alpha + \frac{k_{ij}^\alpha}{\epsilon_\alpha \mu^\alpha} \left( \frac{\partial p^\alpha}{\partial x_i} - \rho^\alpha g_i \right) = 0 \quad (2)$$

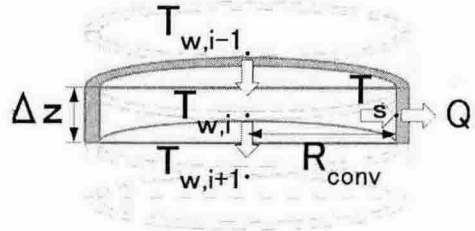


Fig. 1 Circulation water model

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha E^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha E^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(j_i^\alpha T) = \epsilon_\alpha \rho^\alpha Q_T^\alpha \quad (3)$$

U자관내의 순환수의 온도는 1차원 이류확산 방정식인 식 (4)를 이용하여 구했다(Fig. 1). 또한, 순환수에서 열교환기 내표면으로 전달되는 대류 열전달량은 식 (8)에서 계산하였다.

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\lambda_w}{\lambda_w \lambda_w} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - U_w \frac{\partial T_w}{\partial z} + \frac{h P_w}{\rho_w C_w A_w} (T_1 - T_w) \quad (4)$$

$$h = N \frac{\lambda_w}{r} \quad (5), \quad Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (6)$$

n은 가열에서는 0.4, 냉각에서는 0.3이다.

열교환기 내표면에서 지중으로 전달되는 열플럭스는 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$Q = (T_s - T_{w,i}) / (1/hA) \quad (7)$$

### 2.2 지표면 열수지 모델

지표면에서 토양에의 열플럭스(Q)는 지표면 열평형식(식 (8))에 의해 계산했다. Fig. 2는 지표면 열수지 모델의 개념도를 나타낸다.

$$Q = R_{sol} + R_{sky} - R_{surf} - H_{surf} + L_{surf} \quad (8)$$

1) 지표면의 전일사량( $R_{sol}$ )

$$R_{sol} = (1 - \alpha_s)(J_{dn} \times \sin(h) + J_{sh}) \quad (9)$$

여기서,  $J_{dn}$ 은 지표면의 직달일사량,  $\sin(h)$ 는 태양고각도,  $J_{sh}$ 는 천공일사량,  $\alpha_s$ 는 지표면의 일사반사율(albedo)이다.

2) 대기에서 지표면으로의 장파장 방사율( $R_{sky}$ )

$$R_{sky} = \sigma(273.16 + T_a)^4(0.526 + 0.076\sqrt{f})(1 - 0.062 \times c) \quad (10)$$

여기서,  $f$ 는 지표면 부근의 공기의 수증기 분압 [mmHg],  $c$ 는 운량,  $T_a$ 는 외기온도이다.

3) 지표면에서의 장파장 방사율( $R_{surf}$ )

$$R_{surf} = \sigma(273.16 + T_a)^4(1 - 0.062 \times c) \quad (11)$$

4) 현열플럭스( $H_{surf}$ )

$$H_{surf} = \alpha_c(T_s - T_a) \quad (12)$$

여기서,  $T_s$ 는 지표면온도를 나타낸다. 지표면의 대류열전달률  $\alpha_c$ 는 유르게스(Jürges)의 실험식에 의해, 지표부근의 풍속( $v$ )을 이용하여 다음식과 같이 나타낸다.

$$\alpha_c = 5.8 + 3.9v (v \leq 5 \text{ m/s}), \alpha_c = 7.1v^{0.78} (v > 5 \text{ m/s}) \quad (13)$$

5) 잠열플럭스( $L_{surf}$ )

$$L_{surf} = \beta \times 7 \times \frac{133.15}{1000} \alpha_c (f_{sat}(T_s - T_a)) \quad (14)$$

여기서,  $\beta$ 는 지표면의 건습의 효과를 나타내는 계수,  $f_{sat}(T_s)$ 는  $T_s$ 에서의 포화수증기압이다.

### 2.3 시뮬레이션 계산

본 절에서는 길이 20 m의 U튜브형 열교환기를 대상으로, 본 논문에서 제안한 시뮬레이션 코드의 검증 확인을 위한 계산을 하였다. 계산 조건으로 토양의 물성치는 Table 1의 값을 사용하였으며, 기상데이터는 동경의 표준기상데이터를 이용하였다. 운전 스케줄은 난방운전의 경우 12월~2월의 3개월, 냉방은 6월~8월의 3개월로서, 운전시간은 월요일~금요일, 오전 9시~오후 6시까지로 하였다. 열교환기의 입출구 수온차는 2°C, 유량은 3.39 l/min(채열량 475 W(23.7 W/m))의 조건으로 계산하였다.

Fig. 3은 계산 결과로서 연간지중온도의 변동(깊이 12 m, 20 m)을 보여준다. 깊이 12 m와 20 m의 연간지중온도의 변화는 난방기간의 개시와 종료시점에서 1.5°C 정도 저하되었고, 냉방의 경우는 2.2°C 상승하였다. 또한, 중간기에는 서서히 원래 온도로 회복되고 있다.

### 3. 지반조사에 근거한 토양물성치의 추정

건축물의 기초 설계를 위한 지반조사방법은 일본공업규격(JIS), 지반공업회기준(JGS)등에서 조사·시험항목(지하수위, 간극비, 함수비, 포화도, 토입자의 입도 분포 등)이 규정되어, 그러한 조사/시험을 실시하도록 추천하고 있다. 또한 3개 소이상에서 지반조사를 하였을 경우, 지하수 구

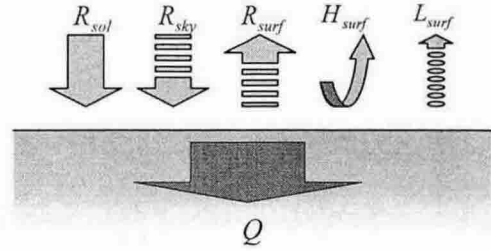


Fig. 2 Thermal balance on ground surface

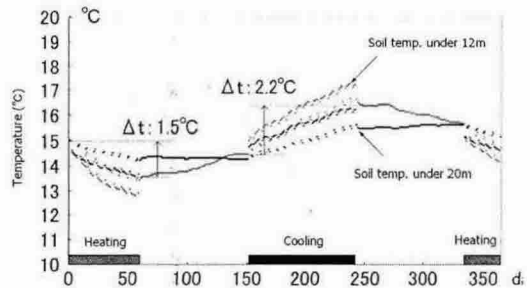


Fig. 3 Annual Fluctuation of Soil Temp.

배에 대한 추정도 가능하다. 본 장에서는 이러한 지반조사항목의 측정결과를 이용하여 토양의 물성치를 추정하는 방법을 제안한다.

#### 3.1 토양 물성치의 추정식

복잡한 구조의 토양도 모델화하면 토입자, 물, 공기의 세 종류의 구조로 구성되어 있는 것으로 가정할 수 있으며, 각각의 체적, 질량, 비열, 열전도율, 열용량의 관계에 의해 토양의 상태를 정량적으로 나타내는 것이 가능하다.

먼저, 지중에서의 열 이동을 해석하기 위해서는 토양의 열정수인 열전도율과 용적비열을 정확하게 구할 필요가 있다. 본 논문에서는 토양의 고체상의 열전도율은 고체상에 포함된 각각의 조성의 열전도율 및 혼합비를 이용해서 식 (15)과 같이 가중기하평균방식<sup>(3)</sup>을 적용하여 구한다.

$$\lambda_s = \lambda_A^{\frac{m}{m+n}} \times \lambda_B^{\frac{n}{m+n}} \quad (15)$$

여기서,  $\lambda_A$ ,  $\lambda_B$ 는 각각 조성 A, B의 열전도율이고  $m$ ,  $n$ 은 각각 A, B의 체적비이다.

토양 전체의 열전도율( $\lambda_{epar}$ )과 열용량(C)은 식 (16), (17)과 같이 각각의 물질의 열전도율, 비

열, 토입자의 밀도 등을 대입하여 병렬 모델로 구했다.

$$\lambda_{epar} = \sum_{i=1}^n V_i \lambda_i \quad (16), \quad C = \sum_{i=1}^n \rho_i C_i V_i \quad (17)$$

여기서  $V_i$ 는 전체체적을 1이라고 할 때의 체적비율을 나타낸다.

또한 투수계수(hydro conductivity) 산출에 있어서는 실험 공식에 의한 추정방법을 이용한다. 이 방법은 포화상태의 비교적 입경이 고른 모래층에 대해 밀도, 간극비, 함수비, 포화도 및 입경가적곡선을 이용하여 간접적으로 투수계수를 구하는 방법이다.

$$\text{Hazen식} \quad k = C_h(0.7 + 0.03t)D_{10}^2 \quad (18)$$

$$\text{Terzaghi식} \quad k = \frac{C_t}{\mu} \left( \frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 D_{10}^2 \quad (19)$$

$$\text{Zunker식} \quad k = \frac{C_k}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} D_w^2 \quad (20)$$

$$\text{Kozeny식} \quad k = \frac{C_z}{\mu} \left( \frac{n}{1-n} \right)^2 D_w^2 \quad (21)$$

여기서,  $k$ 는 투수계수(cm/s),  $t$ 는 온도로, 본 연구에서는 토양의 평균온도(17°C),  $C_h$ (=116),  $C_t$ (=2.6),  $C_z$ (=2.3),  $C_k$ (=2.3)는 각각의 계수,  $\mu$ (=1.07)는 점성계수(mPa·s),  $D_{10}$ 은 입경가적곡선에 있어서 10% 유효지름(cm)를 나타낸다.  $D_w$  식(22)와 같이 정의되는 평균입경으로  $p$ 는 입경범

위를 대표하는 평균 입경  $D_i$ 의 시료가 시료전체에 대해 차지하는 함유율을 뜻한다. 또한 불포화상태에서의 모래층의 투수계수 $k_w$ 는 식 (23)와 같이 포화투수계수 $k$ 와 포화도 $S_r$ 로 나타낸다.

$$\frac{1}{D_w} = \sum \frac{p}{D_i} \quad (22), \quad k_w = S_r^{3.5} k \quad (23)$$

### 3.2 토양물성의 추정

Fig. 4는 동경대학교 생산기술 연구소의 치바 실험실에서 실시한 보링테스트에 의한 지반 조사 결과와 추정식(식 (15)~(23))을 이용해서 계산한 토양 물성치를 나타내고 있다.

여기서 열전도율, 열용량은 구성물질의 열전도율, 비열, 토입자 밀도를 대입하여 구하였다( $\lambda_a=0.025$ ,  $\lambda_w=0.59$ ,  $\lambda_s$ (모래  $\lambda_{sa}=3$ , 흙  $\lambda_{lo}=1.5$ )(W/mK)).

또한 투수계수는 각각의 실험식에 의해 계산하였다. 지표층에서 7 m까지는, 비교적 흙(Loam) 성분이 많은 층으로서 실험 공식의 적용범위 외에 있으므로, 실내 투수 시험에 의한 일반적인 값  $1 \times 10^{-4}$  cm/s을 이용하였다. 8~11 m는 불포화상태로 식 (23)을 이용했고, 11~20 m는 식 (18)~(21)을 이용하여 계산한 결과를 나타내고 있다. 저자들이 실시했던 양수 실험 결과<sup>(4)</sup>에서는 같은 지구의 투수계수가  $2.85 \times 10^{-2} \sim 4.15 \times 10^{-2}$

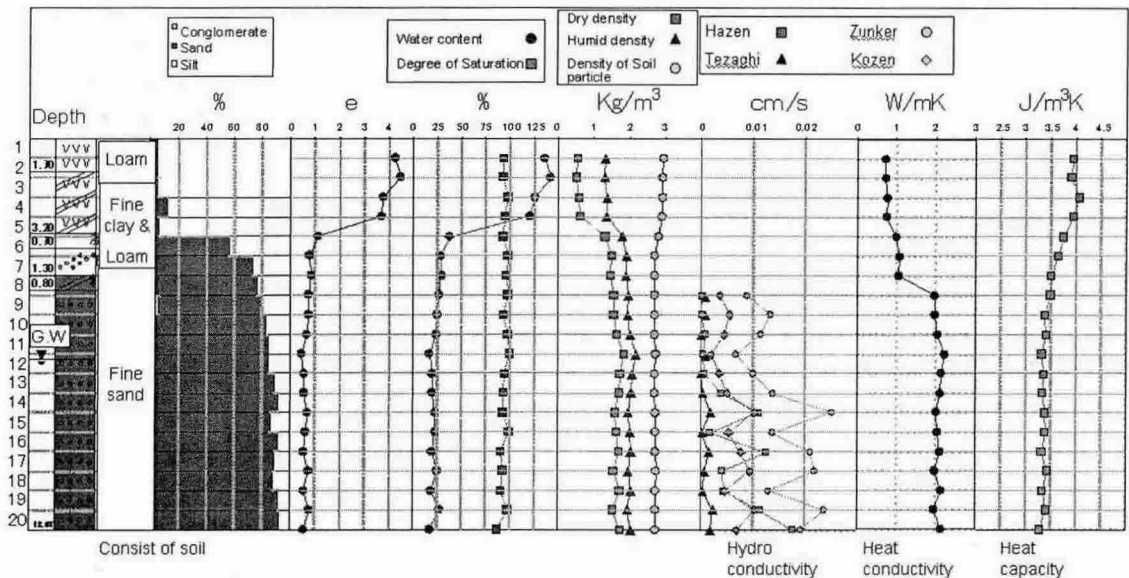


Fig. 4 Thermal properties of soil (Presumption result)

cm/s)이었던 것을 고려하여, 본 연구에서는 가장 근접한 Zunker의 식을 채용하였다. 이상의 결과를 종합하여, 본 부지의 토양 열물성치를 추정, 해석 조건인 Table 1에 반영하였다.

#### 4. 실험과의 비교에 의한 해석정도의 검토

본 절에서는 2004년도 치바 실험실에서 실시했던 지열 이용 공조 시스템의 냉난방 실험을 대상으로, 전 절에서 제안했던 수치 시뮬레이션 수법을 이용하여 실험치와 해석치를 비교함으로써 예측 정도를 검토했다.

##### 4.1 대상 실험의 개요

직경 1.5 m, 깊이 20 m의 현장타설 콘크리트 기초 말뚝을 두 개 매설하고, 각각의 기초 말뚝 외주부에 U자관(외경 45 mm, 내경 35 mm)을 8쌍씩 설치했다. 통상의 오피스빌딩을 가정하여, 월~금요일, 오전9시~오후6시의 냉난방운전을 실시하였다. Fig. 5와 같이 관측점 A, B의 거리에서 지표면, 깊이 10 m, 19 m의 각각의 토양온도를 측정했다. 더욱이 본 부지에 관측점 5개를 설치하여 지하수위의 구배를 관측한 데이터로부터

터 지하수의 수리경사(hydraulic gradient)와, 앞 절에서 추정된 투수계수를 이용해 Darcy의 법칙 정리로 지하수 유속을 계산하여 시뮬레이션에 반영하였다.

##### 4.2 해석 조건

Table 1은 Fig. 4에서 나타났던 토양물성치의 추정치로부터 얻은 해석 조건을 보여준다. 지하수위는 지하12 m이다. 해석 대상으로서 Fig. 5와 같이 26 m×20 m×20 m의 영역의 중심에 직경 1.5 m, 깊이 20 m의 현장타설 콘크리트 기초말뚝을 설치하고 그 주변에 실험과 같이 U자관 열교환기를 재현한 8쌍의 삼각형 매쉬를 작성한 후, 그 표면에 실험에서 얻은 채·방열량과 같은 열 플럭스를 주었다. 지하수의 수위 구배는 5개의 지하수위 관측점에서 측정된 결과를 바탕으로  $2.05 \times 10^{-3} (m/m)$ 로 하였으며, 이것을 유속으로 바꾸면 13.6 m/년이 된다. 지중온도의 초기치는 실험에서 측정된 결과를 사용하여, 깊이 10 m에서 18.1℃, 깊이 19 m에서 17.3℃로 하였고 지하수 온도는 경계영역 밖에서 16.5℃로 일정하게 하였다. 시뮬레이션을 통해 냉난방 실험의 지중온도와의 비교 검증을 실시했다.

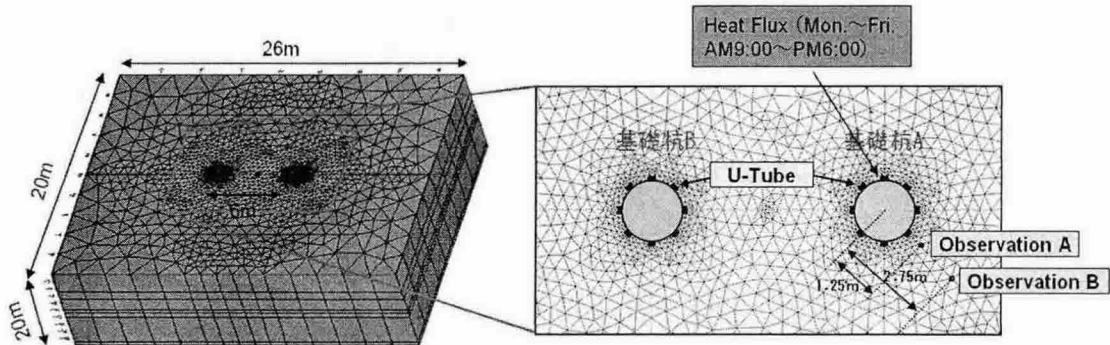


Fig. 5 Analysis mesh model

Table 1 Analysis boundary condition

Depth(m)	0	5	7	10	11	12	19	20	
Porosity	0.8	0.4		0.35					
Hydro conductivity ( $10^{-4}m/s$ )	0.1	1.3		2.1					
Heat conductivity (W/mK)	Solid part 1.5, Fluid part 0.57			Solid part 3.0, Fluid part 0.57					
Heat capacity ( $10^6J/m^3K$ )	Solid part 2.7, Fluid part 4.2								
Flow gradient (m/m)	0					$2.05 \times 10^{-3}$			

### 4.3 해석 결과

Fig. 6은 측정점 A, B의 깊이 10 m에 있어서의 토양 온도 변화를 실험 결과와 계산 결과를 비교한 그래프다. 시뮬레이션 결과는 측정점 A, B 모두 약간의 오차는 있으나 실험 결과를 잘 재현하고 있다. 이 결과로부터 본 연구에서 개발한 예측 모델 및 토양 물성치 추정 수법의 타당성을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 지중의 열·수분이동 시뮬레이션 코드인 FEFLOW에 열교환기내의 순환수 모델과 지표면 열플럭스 모델을 추가하여, 지중 열교환기의 채열량 예측모델을 개발하였다. 또한 건축물의 기초 설계시 행하는 통상적인 지반조사 결과를 이용하여 시뮬레이션에 필요한 토양의 물성치를 추정하는 방법을 제안하였다. 그 추정 결과와 개발한 예측 모델을 이용하여 시뮬레이션을 실행하였으며, 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교 검증함으로써 본 채열량 해석모델의 타당성을 확인하였다.

### 참고문헌

1. Ooka R. and Hwang S. H., 2005-9, The Development of Geothermal Air-conditioning System Using Ground Heat Exchanger utilizing Building's Cast-in-place Concrete Pile Foundation (Part6), Architectural Institute of Japan Annual Conference, vol. D-2, pp. 665-666.
2. FEFLOW 5.1 Reference Manual, WASY Software
3. Kasubuchi T., 1984, Heat conduction model of saturated soil and estimation of thermal conductivity of soil solid phase, Journal of Soil Science pp. 240-247
4. Hwang S. H., Ooka R., 2004-9, The Development of Geothermal Air-conditioning System Using Ground Heat Exchanger utilizing Building's Cast-in-place Concrete Pile Foundation (Part5), JAPAN SHASE 2004' Annual Conference, pp. 1659-1662.
5. Nagano K. and Ochifuji K., 1993, A Study on the Ground Coupled Heat Pump System, JAPAN Journal of SHASE, No.54 pp. 55-66.

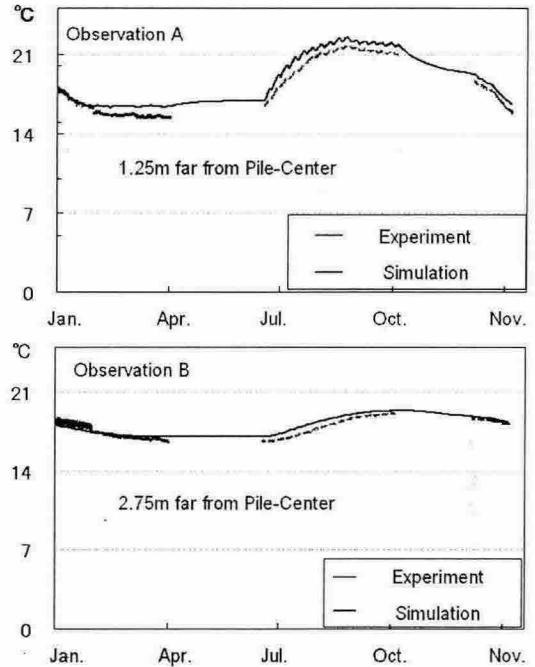


Fig. 6 Comparison of ground temperature fluctuations(Observation A, B)