

열·수분 동시이동 모델을 이용한 지하구조물 및 주변지반의 열수분성장 예측에 관한 연구

박경순*†, 손원득

삼신설계(주) 부설 삼신에너지환경연구원

Computational Analysis of the Heat/Moisture Characteristics and Heat Load of Underground Structures

Kyung-Soon Park*†, Won-Tug Son

Sahm Shin Engineers, INC. Sahm Shin Energy and Environment Institute

ABSTRACT: This study was conducted to clarify the heat load characteristics and heat and moisture behavior of underground structures. The authors achieved this by carrying out a numerical analysis using simple heat diffusion and simultaneous heat and moisture transfer equations based on measurement data. This paper presents the results of a numerical analysis on the heat load characteristics and heat and moisture behavior of an underground basement and its surrounding ground under a condition of internal heat generation. The authors found it difficult to predict the heat behavior and heat load of the underground basement by simple heat diffusion alone. Accurate prediction of the thermal environment and heat load requires careful consideration of the influences of moisture and precipitation

Key words: Underground Basement(지하구조물), Numerical analysis(수치해석), Simultaneous heat and moisture transfer(열수분 동시이동), Heat Load(열부하)

Nomenclature

c : specific heat of concrete/soil containing the moisture (J/kg K) C_Y : heat capacity of moist air (J/m³ K) C_Y' : moisture capacity of moist air (kg/m³ Pa) F_w : gravity (m/s²) J_p : rate of precipitation (kg/m² s) J_i : internal moisture generation (kg/m³ s) n : inward normal vector N_i : rate of change of the room air (times/hour) P : water vapor partial pressure (Pa) P_o : water vapor partial pressure of outdoor air (Pa) P_j : water vapor partial pressure of the inner surface of the wall (Pa) P_r : water vapor partial pressure of indoor air (Pa) P_{sat} : saturated water vapor partial pressure (Pa) q_{noc} : heat flux due to longwave net sky radiation (W/m²) q_{sol} : heat flux due to absorbed solar radiation (W/m²) Q_i : internal heat generation (W/m³) r : heat of vaporization water (J/kg) R_v : universal gas constant for water vapor (Pa m³/kg K) S_j : area of j th part of the inside wall (m²) t : time (s) T : temperature (K) T_j : surface temperature of j th part of the inside wall (K) T_o : outdoor air temperature (K) T_i : indoor air temperature (K) T_e : temperature at the earth

surface (K) V : volume of the room (m³) a : total heat transfer coefficient (W/m² K) a_c : convective heat transfer coefficient (W/m² K) a_r : radiative heat transfer coefficient (W/m² K) a_m' : vapor transfer coefficient related to the difference of water vapor partial pressure (kg/m² s Pa) a_T' : moisture transfer coefficient related to temperature (kg/m² s K) a_{μ}' : moisture transfer coefficient related to water chemical potential (kg/m² s (J/kg)) λ : thermal conductivity (W/m K) λ_T' : total moisture conductivity for temperature gradient (kg/m s K) λ_{Tg} : moisture conductivity in the gas phase for the temperature gradient (kg/m s K) λ_{μ}' : total moisture conductivity for water chemical potential gradient (kg/m s (J/kg)) $\lambda_{\mu g}'$: moisture conductivity in the gas phase for the water chemical potential gradient (kg/m s (J/kg)) μ : water chemical potential relative to free water (J/kg) μ_o : water chemical potential of the outdoor air (J/kg) μ_s : water chemical potential at the earth surface (J/kg) ρ : density of concrete/soil (kg/m³) ρ_w : density of liquid water (kg/m³) ϕ : water content (m³/m³)

† Corresponding author

Tel.: +82-2-578-5671; fax: +82-2-578-8378

E-mail address: pks2180@ssei.co.kr

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

지하구조물은 지상건축물과 달리 주변토양이

가지는 축열성 및 단열성 등으로 열적으로 우수한 환경을 가짐과 동시에 수분의 영향으로 인한 결로 및 누수와 같은 영향또한 큰 크리티컬한 부분이 공존한다고 할 수 있다. 콘크리트와 토양은 모두 다공질체이며 지하공간과 같이 수분의 영향을 크게 받는 곳에 대해서는 열이동과 함께 수분의 이동에 대해서도 동시에 고려해야 마땅하다.

최근 건축기술의 발달과 도심지 토지의 유효이용 등과 같은 여러 가지 목적으로 과거에 비해 지하구조물이 다수 건립되고 있으며, 비주거공간으로 주로 이용하던 과거와 달리 현재는 그 활용방도 또한 다양해지고 있는 현실이다.

본 논문에서는 다년간에 걸쳐 실제 지하구조물 및 그 주변토양을 대상으로 실측을 통해 획득한 실험데이터를 이용하여, 단순열전도 방정식 및 열수분 동시이동 방정식을 이용한 비선형 수치해석을 수행하여 그 결과를 제시함으로써, 지하구조물의 열환경 및 부하예측에 대한 비선형수치해석 적용의 타당성을 나타내고자 한다.

2. 수치해석

Fig. 1에 단순열전도 및 비선형 열수분 동시이동 방정식을 이용한 수치해석에 적용한 지하구조물 및 주변지반의 모델과 경계조건을 나타낸다.

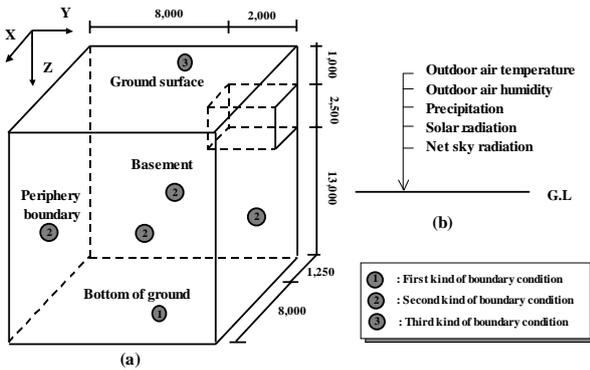


Fig. 1 Schematic diagram of the analyzed system(Unit:mm)

2.1 단순열전도 방정식에 의한 수치해석

$$\frac{\partial}{\partial t}(c\rho T) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$c\gamma V \frac{\partial T_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha_j (T_j - T_r) + c\gamma N_v V (T_o - T_r) + Q_r \quad (2)$$

단순열전도 방정식의 지배방정식은 식(1) 및 식(2)와 같으며, 그 외 계산에 이용한 물성치는 Table 1과 같다. 계산은 유한차분법(시간항: 전진차분, 확산항: 중심차분)을 이용하였다.

Table 1. Calculation condition and physical properties

Outdoor condition		Outdoor air temperature and solar radiation (measured value)			
Ventilation rate		2.2 times per hour			
Heat transfer coefficient	Indoor air	9.30 [W/m ² K]			
	Outdoor air	23.26 [W/m ² K]			
CASE		A ₁	A ₂	B ₁	B ₂
Solar absorption ratio		0.83	-	0.83	-
Emissivity		0.9	-	0.9	-
Thermal conductivity	Soil	3.14 [W/mK]		2.09 [W/mK]	
	Concrete	1.86 [W/mK]		1.50 [W/mK]	
Heat capacity	Soil	2637.7 [kJ/m ³ K]		2351.9 [kJ/m ³ K]	
	Concrete	3140.1 [kJ/m ³ K]		2280.0 [kJ/m ³ K]	
	Air	1256.0 [J/m ³ K]			

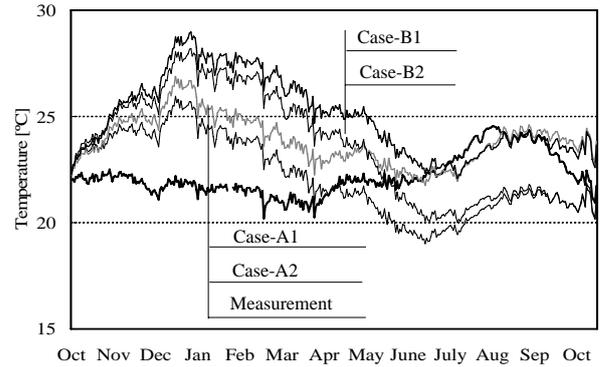


Fig. 2 Annual variation of the indoor air temperature of the basement

Fig. 2에 지하구조물의 연간 실내온도의 실측치와 단순열전도에 의한 수치해석결과의 비교를 나타내었다. 그림에서 나타내는 바와 같이 물성치 및 경계조건에 상이점과 상관없이 단순열전도에 의한 수치해석으로는 실내온도환경에 대한 예측이 불합리함을 확인 할 수 있다.

2.1 열수분 동시이동 방정식에 의한 수치해석

$$\frac{\partial}{\partial t}(c\rho T) = \nabla \cdot (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \nabla T + \nabla r \lambda'_{\mu g} \nabla \mu \quad (3)$$

$$\rho_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \lambda'_{\mu} (\nabla \mu - F_w) + \nabla \lambda'_{T} \nabla T \quad (4)$$

$$-(\lambda + r\lambda'_{T_g})\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_s - r\lambda'_{\mu_g}\left(\frac{\partial \mu}{\partial n}\Big|_s - nF_w\right) = (\alpha + r\alpha'_T)(T_o - T_s) + r\alpha'_\mu(\mu_o - \mu_s) + q_{sol} + q_{noc} \quad (5)$$

$$-\lambda'_\mu\left(\frac{\partial \mu}{\partial n}\Big|_s - nF_w\right) - \lambda'_T\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_s = \alpha'_\mu(\mu_o - \mu_i) + \alpha'_T(T_o - T_i) + J_p \quad (6)$$

경계면 이중물질에 의한 열 수분 경계조건에 대한 방정식은 다음과 같다.

$${}_a\mu = {}_b\mu (= \mu), \quad {}_aT = {}_bT (= T) \quad (7)$$

$$-(\lambda + r\lambda'_{T_g})\frac{\partial {}_aT}{\partial n} - r\lambda'_{\mu_g}\left(\frac{\partial {}_a\mu}{\partial n} - nF_w\right) = -(\lambda + r\lambda'_{T_g})\frac{\partial {}_bT}{\partial n} - r\lambda'_{\mu_g}\left(\frac{\partial {}_b\mu}{\partial n} - nF_w\right) \quad (8)$$

$$-\lambda'_\mu\left(\frac{\partial {}_a\mu}{\partial n} - nF_w\right) - \lambda'_T\frac{\partial {}_aT}{\partial n} = -\lambda'_\mu\left(\frac{\partial {}_b\mu}{\partial n} - nF_w\right) - \lambda'_T\frac{\partial {}_bT}{\partial n} \quad (9)$$

지하공간내 열이동방정식은 식(2)와 같으며 수분에 대한 방정식은 식(10)과 같다.

$$c'\gamma'V\frac{\partial p_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j\alpha'_m(p_j - p_r) + c'\gamma'N_vV(p_o - p_r) + J_r \quad (10)$$

수분화학포텐셜 μ 와 수증기압 p 와의 관계는 다음과 같다.

$$\mu = R_vT \ln\left(\frac{p}{p_{sat}}\right) \quad (11)$$

Table 2에 해석에 이용한 열수분 물성치를 나타내낸다.

Table 2. Heat and moisture transfer coefficients and other properties

Heat capacity of air	$C\gamma$ [J/m ³ K]	1256.0
Moisture capacity of air	$C'\gamma'$ [kg/m ³ Pa]	7.5×10^{-6}
Heat transfer coefficient [W/m ² K]	Indoor air a_i	9.30
	Outdoor air a_o	23.26
Moisture transfer coefficient [kg/m ² s Pa]	Indoor air a'_m	2.85×10^{-8}
	Outdoor air a'_{mo}	1.14×10^{-7}
Solar absorption ratio and emissivity 0.83 [-]/0.9[-]		

Subscript i : indoor air o : outdoor air

해석시 콘크리트의 물성치는 Göran의 실측치를, 토양의 물성치는 July의 실측치를 이용하였다. 본 논문에서는 지면관계로 콘크리트 및 토양의 특성 곡선은 생략하기로 한다.

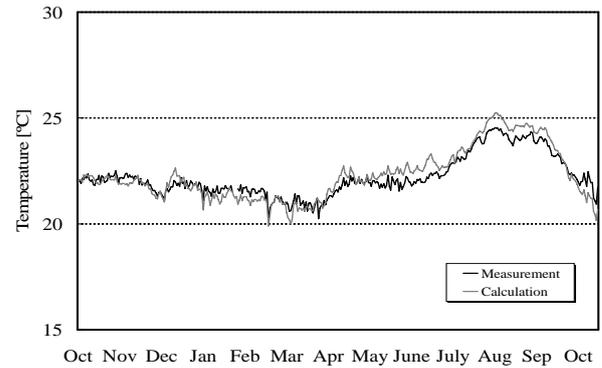


Fig. 3 Annual indoor air temperature variation of measured and calculated value(daily average values)

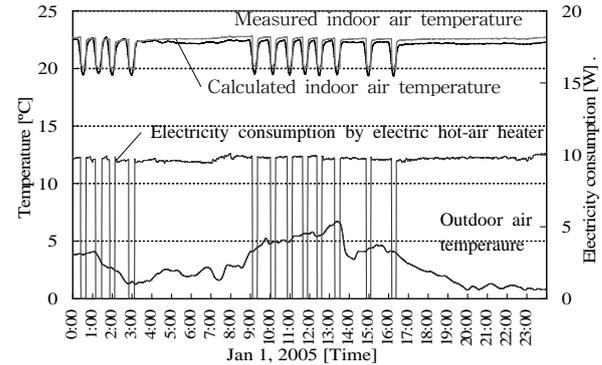


Fig. 4 Variation of indoor air temperature on a typical day

Fig. 3에 지하실 실내온도의 실측치와 계산치의 비교를 나타낸다. 그림에서 나타내는 바와 같이 연간을 통틀어 거의 차이가 없고 특히, 난방기간(실험조건으로 실내온도를 22°C로 일정하게 유지하기 위하여 실험 지하실내에 전열식 온풍히터를 설치하여 난방, 10월~5월말)에 관해서는 거의 진폭도 일치하고 있음이 확인된다.

Fig. 4에는 전열히터로 난방중인 동계의 하루를 대상으로 실내온도의 실측치와 계산치의 비교를 나타내었다. 그림에서 나타낸바와 같이 계산치는 히터의 On/Off제어에 의한 실내온도의 변동을 거의 오차가 없는 온도범위내에서 재현하고 있음을 확인할 수 있다.

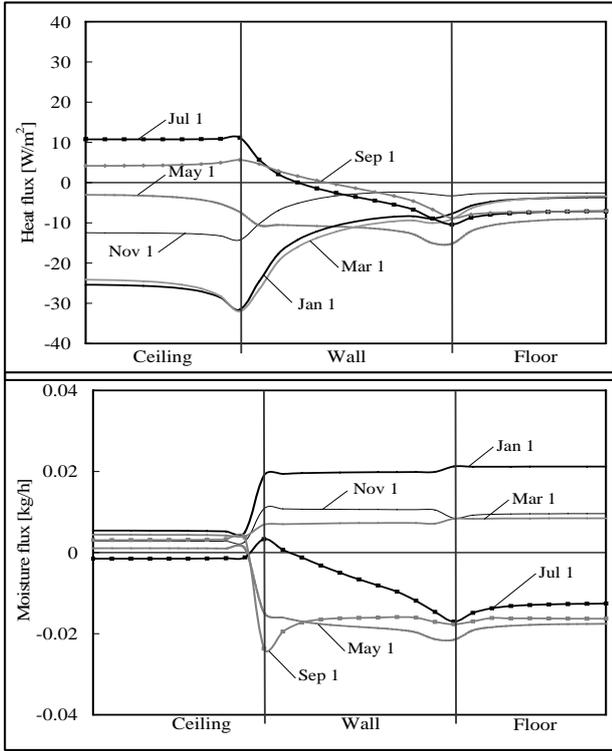


Fig. 5 Heat and moisture flux on the inner surface of the wall

Fig. 5에 지하실내 벽체표면에서의 열류 및 수분류의 흐름을 나타낸다. 그림에서 나타내는 바와 같이 열류의 경우 난방기간에는 지하실에서 벽쪽으로 흐르며, 비난방기간에는 천정과 벽체 상부 표면에서 실내쪽으로 흐르는 것을 알 수 있다.

수분류는 난방기간에는 실내 발열의 영향으로 벽표면에서 방습이 일어나고, 비난방기간에는 고온다습한 외기에 의한 환기의 영향으로 흡습이 발생함을 알 수 있다. 그 외 지하구조물 주위 토양의 온도 및 수분의 실측치와 계산치의 비교를 실시하여 충분한 정밀도로 예측이 가능함을 확인하였다. 또한 벽체 내부의 내부결로에 대한 검토를 실시하여, 벽체내에 연간 내부결로가 발생하지 않음을 알 수 있었다.

3. 지하구조물의 열부하 특성

단순열전도 방정식과 열수분 동시이동 방정식에 의한 수치해석 결과의 비교검토를 통하여 지하구조물 및 주변지반의 열성상 예측에 단순열전도 방정식을 이용함은 타당하지 않다는 것을 확인하였다. 여기에서는 지하구조물의 열부하 예측에 관하여 연간 실측치를 바탕으로 단순열전도 및

열수분 동시이동 방정식을 이용한 수치해석결과를 상호 비교하고자 한다.

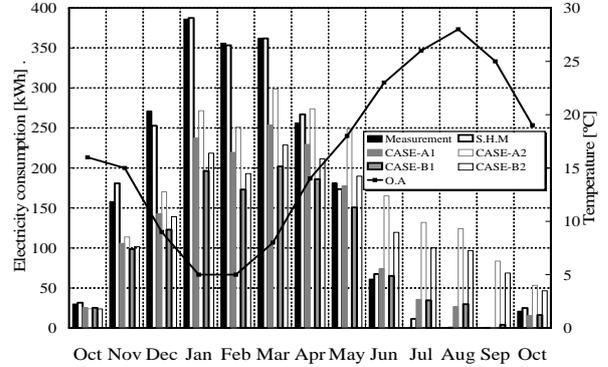


Fig. 6 Comparison between the measurement of the monthly integral electricity consumption and the calculated heat load (S.H.M :nonlinear simultaneous heat and moisture transfer)

Table 3. Comparison of the results of heat load calculation

	Annual integrated value[kWh]	Peak load [W]	Outbreak period [Month]
Measurement	2082.0	600.2	1
CASE-A1	1528.5	523.3	4
CASE-A2	2156.4	580.5	4
CASE-B1	1288.0	448.0	4
CASE-B2	1691.2	488.6	4
S.H.M	2112.0	612.0	1

Note: S.H.M is the result by nonlinear simultaneous heat and moisture transfer

Fig. 6에 난방용 전열히터에 의한 월별 적산 소비전력량의 실측치와 각 수치해석의 결과치를 비교하여 나타내었다. Table 3에는 피크부하, 연간 부하, 피크부하 발생시기를 실측치와 함께 비교하였다.

도표에서 나타내는 바와 같이 단순열전도 방정식에 의한 결과치중 CASE-A2의 결과값이 연간 부하, 피크부하가 가장 일치하고 있지만 실측치의 피크부하 발생월이 1월인데 반하여 계산치는 4월에 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 지하구조물의 열부하 예측에 단순열전도 방정식을 이용하는 것은 지하구조물의 온열성상의 예측과 마찬가지로 타당하지 않다고 판단된다. 그에 반하여, 열수분동시이동 방정식을 이용한 비선형해석 결과는 도표에서 나타내는 바와 같이 월별 누계,

연간 부하, 피크부하 및 그 발생시기도 실측치와 잘 일치하고 있음을 보여준다.

따라서, 지하구조물 및 주변지반의 온열성상과 열부하를 정량적으로 정밀도 높게 예측하기 위해서는 열 및 수분의 이동을 고려한 비선형 수치해석을 적용함이 타당하다고 사료된다.

4. 결론

지하구조물 및 주변지반의 온열환경과 열부하 예측에 관하여 수치해석을 실시하고 실측치와 비교분석한 결과, 단순열전도만으로는 지상과 달리 수분의 영향을 많이 받는 지하구조물에는 예측의 정밀도가 낮아서 적용이 불합리함을 확인하였다. 그 외 결과는 다음과 같다.

- 1) 단순열전도 방정식만으로는 지하구조물 및 주변지반의 온열성상과 열부하를 예측함이 불합리하다.
- 2) 지하구조물 내부의 온도 및 습도에 관해서도 열수분 동시이동에 의한 비선형 수치해석의 결과가 실측치와 잘 일치함을 확인하였다.
- 3) 지하구조물 내부 벽표면에서의 방습은 주로 난방기간에 발생하고, 이는 난방용 전열온풍히터에 의한 영향으로 판단된다. 흡습은 이와 반대로 환기용 고온다습한 하절기 공기의 유입으로 인하여 비난방기간에 발생함을 확인하였다.
- 4) 비선형 수치해석에 의한 온도 및 수분화학포텐셜의 계산치가 실측치와 좋은 일치를 나타냄을 확인하였다.
- 5) 지하구조물의 연간부하, 월별 누계부하, 피크부하, 피크부하 발생일에 관한 수치해석결과도 비선형 수치해석의 해석치가 실측치와 잘 일치함을 확인하였다.

따라서, 정확하게 주변지반을 포함한 지하구조물의 온열환경 및 열부하를 예측하기 위해서는 강우와 지반내 함수상태 등을 고려한 수치해석을 수행할 필요가 있다고 사료된다.

향후 연구과제로서는 비선형 수치해석이 엄청난 계산시간과 막대한 양의 데이터를 필요로 하는 점과 지하구조물의 규모에 따른 적용범위 등을 설정하기 위하여 열수분 방정식의 근사화 및 지하구조물의 규모별 적용성에 관한 연구를 수행할 필요가 있다고 사료된다.

참고 문헌

1. Park, K.S., Nagai, H., and Iwata, T., (2006) Study on the Heat Load Characteristics of Underground Structures Part1. Field Experiment on an Underground Structure under an Internal Heat Generation Condition. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 5, No. 2, 421-428
2. Ogura, D., (2000) Study on the Heat and Moisture Behavior of the Underground Structure. Doctor Thesis, Kobe University, Japan, 18-34
3. Matsumoto, M. and Ogura, D., (1995) An Analysis of Heat and Moisture Behavior of Underground Space and Its Surrounding Ground Under Natural Condition. Journal of Architecture, Planning, and Environment Engineering, AIJ, No. 474, 27-36
4. Göran, H., (1993) Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement and Cement Paste, Ph thesis, Division of Building Materials Lund Institute of Technology
5. Jury, W., (1973) Simultaneous Transport of Heat and Mass through a Medium Sand, Ph thesis, University of Michigan
6. Edited by Thermophysical Properties Inst (1990) Thermophysical Properties Handbook, Yokendo, Japan