

Ground-Coupled 바닥구조체의 열전달 모델링

임 병 찬[†]

Colorado 대학교 토목환경건축공학과

An Approach to Model Ground-Coupled Building Foundation for Energy Simulation

Pyeongchan Ihm[†]

Department of Civil, Environmental & Architectural Eng., University of Colorado, Boulder, CO, 80309, USA

(Received April 12, 2004; revision received May 31, 2004)

ABSTRACT: In this paper, a two-dimensional transient ground-coupled numerical model for slab-on-grade foundation is developed and integrated into EnergyPlus. A validation analysis is first presented to ensure that for the developed building foundation heat transfer module is properly implemented within EnergyPlus. Then, the predictions from the developed model are compared to those obtained from the simplified building foundation model currently used in EnergyPlus. The results show that the developed foundation heat transfer module accounts better for the effects of the ground thermal mass attributed to the ground than the simplified foundation model currently used in EnergyPlus.

Key words: Ground heat transfer(지중 열전달), Insulation(단열)

기 호 설 명

c_p : 비열 [J/kg·°C]
 D_h : Heat turbulent transport 계수 [m/sec]
 D_w : Water mass turbulent transport 계수 [m/sec]
 e : 대기의 수증기압 [N/m²]
 F : 형태계수
 h_c : 대류열전달계수 [W/m²·°C]
 k : 열전도율 [W/m·°C]
 $q_{a,sol}$: 직사, 반사, 확산에 의하여 흡수되는 태양복사량 [W/m²]

q_{conv} : 대류에 의한 열손실 또는 열취득 [W/m²]
 q_{cs} : 대류에 의한 현열량 [W/m²]
 q_{et} : 증발산량 [W/m²]
 q_{ground} : 지면의 열류 [W/m²]
 q_{ki} : 내표면의 전도에 의한 열류 [W/m²]
 q_{ko} : 외표면의 전도에 의한 열류 [W/m²]
 q_{LWR} : 장파장 복사량 [W/m²]
 q_{LWS} : 장비나 인체 등과 같이 열원으로부터 방출되는 복사량 [W/m²]
 q_{LWX} : 복사열 교환에 의한 복사량 [W/m²]
 q_{sol} : 창문에서 전달되는 단파장복사량 [W/m²]
 q_{SW} : 실내발열에 의하여 흡수되는 직사 및 확산단파장복사량 [W/m²]
 R_g : 지표면에서의 복사량 [W/m²]
 R_{sky} : 천공복사량 [W/m²]

[†] Corresponding author

Tel.: +1-303-492-0516; fax: +1-303-492-7317

E-mail address: tetonsy@empal.com

| | |
|-------------|--|
| R_{sol} | : 흡수된 태양복사량[W/m ²] |
| $R_{sol,i}$ | : 수평면에 입사하는 총태양복사량 [W/m ²] |
| R_i | : 지표면에 흡수된 전체 태양복사량과 적외선 복사량 [W/m ²] |
| t | : 시간 [sec] |
| T | : 온도 [°C] |
| T_{db} | : 외기의 건구온도 [°C] |
| T_{deep} | : 지중면 온도 [°C] |
| T_{wb} | : 외기의 습구온도 [°C] |

그리스 문자

| | |
|---|--|
| α_{sol} | : 지표면의 albedo |
| ϵ | : 방사율 |
| ρ | : 밀도 [kg/m ³] |
| σ | : Stefan-Boltzmann 상수 |
| $\left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right]$ | : 공기의 물리적 특성을 나타낸 도표화된 무차원 상수 ⁽¹⁾ |

하첨자

| | |
|-------|-------|
| a | : 공기 |
| g | : 지표면 |
| i | : 실내측 |
| o | : 실외측 |
| s | : 표면 |
| sky | : 천공 |

1. 서 론

기후변화에 의한 환경적 영향을 받는 지상층 건물구조체의 열전달 과정은 널리 연구가 진행되어 왔다. 지상층 구조물은 단열성능의 향상으로 열손실이 점차 줄어들고 있으나 지하구조물 및 지중은 상대적으로 연구가 적다. 건물에너지 해석프로그램에서 Slab-on-grade 바닥구조체의 열전달은 건물외피와는 달리 정상(steady-state) 상태로 가정하여 간략하게 해석한다.⁽²⁾

미국 에너지성(Department Of Energy)은 EnergyPlus라는 새로운 건물에너지 해석용 프로그램을 발표하였다.⁽³⁾ 이 프로그램의 특징 중 하나는

기존의 프로그램에 새로운 프로그램 모듈을 쉽게 넣어서 그 기능을 추가할 수 있도록 설계되었다. EnergyPlus는 CTF(conduction transfer function)를 사용하여 건물외피의 1차원 열전달을 계산한다. 또한, 건물 바닥면이 지반에 닿아 있으면 입력한 각 월별 지중온도를 외부 경계값으로 고려하여 다른 건물외피와 같이 1차원의 CTF를 통하여 지중에서의 열류를 계산하고 있다. 이러한 방법은 기후에 의한 외부환경의 영향을 거의 받지 않는 다차원의 열전달 특성을 갖는 지반구조물의 열류계산에 부적합하다.

1970년대부터 지중의 열전달 해석에 관한 연구가 진행되어 왔다.⁽⁴⁻⁷⁾ 대부분의 지중의 열성능에 관한 연구는 실내온도가 항상 일정하다는 가정하에서 진행되어 왔다. 이는 실제로 건물의 간헐공조의 경우에는 다르게 해석되어야 한다.

본 연구는 2차원 Ground-coupled 열전달 모델링 개발을 목적으로 하였다. 이를 EnergyPlus와 연계하여 시뮬레이션을 통한 Slab-on-grade 바닥구조체를 가진 건물의 열성능을 파악하였으며 지중의 비정상(unsteady-state) 열전달 해석을 통하여 지중온도 분포를 예측하였다.

2. Ground-coupled 열전달 모델링

2.1 건물외피와 지중의 열전달 모델링

건물구조체와 지중의 비정상상태의 온도분포는 시간에 따른 열전도방정식에 의한다. 비정상 조건 하에서 2차원 열전도방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ k \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right\} = \rho c_p \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} \quad (1)$$

Ground-coupled 건물구조체의 열해석을 위하여 아래와 같은 3가지 경계조건을 고려해야 하며, 이들을 식(1)의 경계조건으로 사용한다.

- 건물 외피의 내표면 및 외표면
- 지표면
- 지중의 하부면

2.1.1 건물외피의 내표면 및 외표면

태양복사, 건물외피의 장파장복사, 단파장복사

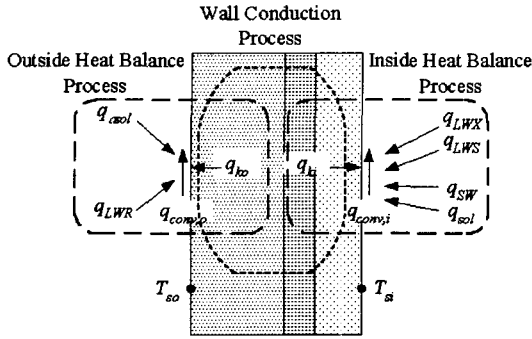


Fig. 1 Heat balance procedures for a typical opaque building envelope.

의 열류를 계산하기 위하여 EnergyPlus의 열평형식을 사용한다. Fig. 1은 일반적인 건물의 외피의 열평형관계를 도식화하였다.

Fig. 1에서 건물외피의 외표면과 내표면의 열평형식은 식(2)~(3)으로 나타낸다.

$$q_{ho} = q_{conv,o} + q_{sol} + q_{LWR} \quad (2)$$

$$q_{hi} = q_{conv,i} + q_{SW} + q_{sol} + q_{LWX} + q_{LWS} \quad (3)$$

여기서 대류에 의한 열류량은 식(4)와 같으며, 대류열전달계수는 EnergyPlus에 의하여 계산된다.

$$q_{conv} = h_c (T_{o(or i)} - T_s) \quad (4)$$

대기, 천공, 지표면에서 건물 외표면에 영향을 미치는 장파장 복사량(q_{LWR})은 식(5)에 의하여 계산된다.⁽⁸⁾

$$q_{LWR} = \epsilon_{so} \alpha [F_a (T_o^4 - T_{so}^4) + F_{sky} (T_{sky}^4 - T_{so}^4) + F_g (T_{gs}^4 - T_{so}^4)] \quad (5)$$

2.1.2 지표면

지표면에서는 여러 가지 열전달 메커니즘이 일어나며 이는 다음과 같다.

- 지중에서의 열전도
- 바람에 의한 대류
- 비와 눈 등에 의한 증발산
- 대기과 지표면으로부터의 장파장 복사
- 태양으로부터의 단파장 복사

Ground-coupled 열전달을 모델링하기 위하여 식(6)의 열평형식을 지표면에 적용한다.⁽⁹⁾

$$q_{ground} = R_t - q_{cs} - q_{et} \quad (6)$$

지표면에 흡수된 전체 태양복사량과 적외선복사량(R_t)는 식(7)과 같다.

$$R_t = R_{sol} + R_{sky} - R_g \quad (7)$$

$$R_{sol} = (1 - a_{sol}) R_{sol,i} \quad (8)$$

$$R_{sky} = \epsilon_{sky} \sigma T_{db}^4 [a - b \exp^{-2.3ce}] \quad (9)$$

$$R_g = \epsilon_g \sigma T_g^4 \quad (10)$$

여기서 a , b , c 는 경험에 의한 계수이며 각각 0.82, 0.25, 0.094이다.⁽⁹⁾

대류에 의한 열류(q_{cs})와 증발산에 의한 열류(q_{et})는 식(11)~(12)로 계산된다.

$$q_{cs} = \rho_a C_{p,a} D_h (T_g - T_{db}) \quad (11)$$

$$q_{et} = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_t - q_{ground}) + \rho_a C_{p,a} D_w (T_{db} - T_{wb}) \quad (12)$$

2.1.3 지중의 하부면

지중의 하부면 즉 지면으로부터의 일정 깊이 아래에 있는 경계면으로, 열류가 0이거나 지하수의 온도조건에 따라서 일정한 값으로 주어진다. 지상의 기후변화에 의한 지중온도의 급변동은 지표면으로부터의 일정 깊이까지의 지하에서 일어나는 것이 실험에 의하여 증명되었다.⁽¹⁰⁾ 따라서 식(13)는 지중 하부면의 경계조건을 나타낸다. 또한 Bahnfleth⁽¹¹⁾는 지표면의 상태가 건물 바닥구조체의 열전달 특성에 큰 영향을 미치며 지면으로부터 지중 하부면까지의 깊이가 깊을 경우 지중 하부면 온도의 영향은 아주 적은 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 지중 하부면의 깊이를 지표면으로부터 8m 아래로 가정하였다.

$$T = T_{deep} \quad (13)$$

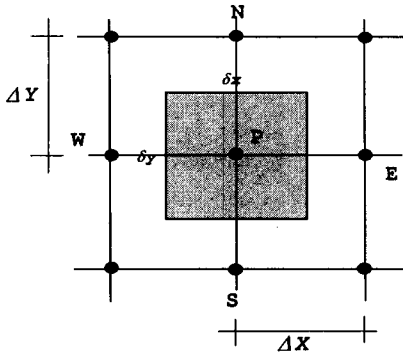


Fig. 2 Control volume for a typical node.

앞에서 정의한 식(3), 식(6), 식(13)의 경계조건을 가지고 식(1)의 열전도 방정식을 제어부피법(control volume method)⁽¹²⁾과 시간증분과 제어부피의 크기에 무관하게 안정된 음유한차분법(implicit finite difference method)을 사용하여 지중에 관한 열해석을 한다. Fig.2는 제어부피와 이와 관련된 노드(Node)의 크기를 나타낸다. 노드 P에 대하여 E와 W는 x방향의 이웃한 노드이며 N과 S는 y방향의 노드이다. 노드 간의 크기(Δx , Δy)는 컴퓨터의 계산시간과 메모리의 필요량을 줄이기 위하여 표면의 경계조건이나 서로 다른 재료가 만나는 곳 등에서는 아주 작고 비교적 노드 간의 온도차가 적을 것으로 예상되는 곳에서는 점차 커지는 비균등 격자를 사용했으며 가장 작은 격자의 크기는 0.05 m이다. 지중해석을 위하여 생성된 노드의 갯수가 많기 때문에 일반적인 Gauss-Seidel 방법으로는 매트릭스(Matrix) 연산을 수행할 수 없으므로 LAPACK⁽¹³⁾이라는 매트릭스 전용 계산프로그램을 사용하여 선형방정식의 해를 구한다.

2.2 EnergyPlus와 Ground-coupled 열전달 모델과의 연계

1차원 열전달 모델을 사용하는 EnergyPlus의 특성 때문에 2차원인 Ground-coupled 열전달 모델을 연계시키기가 용이하지 않다. 이를 해결하기 위하여 가상의 바닥구조체(imaginary floor)를 EnergyPlus에 하나의 구성요소로 설정하고 Slab-on-grade 바닥구조체를 이와 연결시켜서 지중으로부터의 열류를 계산한다.

Fig. 3는 기존의 EnergyPlus 프로그램에 Ground-

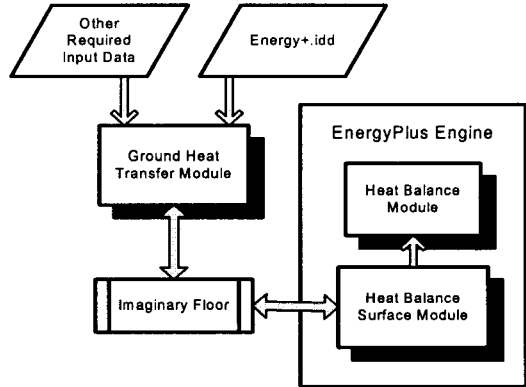


Fig. 3 Flow chart of implementation of ground-coupled heat transfer module.

coupled 열전달 모델을 연결시키는 흐름도를 나타낸다. 여기서 Energy+.idd는 EnergyPlus에서 필요로 하는 데이터에 관한 형식을 지정해 주는 것으로 Ground-coupled 열전달 모델 해석에 필요로 하는 추가적인 입력데이터(경계조건, 단열재 배치사항, 물성치 등) 양식을 이곳에 기술한다.

또한, Ground-coupled 열전달 모듈을 EnergyPlus와 연결시키기 위해서는 기존 모듈들을 수정해야 한다. 그중에서 HeatBalance 모듈과 Heat-Balance Surface 모듈이 건물구조체의 열해석을 담당하며, 이는 가상의 바닥구조체(imaginary floor)를 통하여 Ground-coupled 열전달 모델과 결합된다.

2.3 Ground-coupled 열전달 모델의 검증

Ground-coupled 열전달 모델과 EnergyPlus의 연계상태를 이 절에서 건물 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

Fig. 4는 대상건물의 형태와 건물외피의 구조체에 관하여 설명하였다. 대상건물은 4.2m×4.2m×3.0m 크기의 하나의 존으로 구성되며, Slab-on-grade 바닥구조체를 가진 단층건물이다. 외벽과 지붕은 0.2m 두께를 가진 단열재와 콘크리트 구조체로 이루어져 있다. 바닥구조체는 0.12m 두께의 중량 콘크리트와 0.025m 두께의 단열재로 형성되어 있다. 그 아래에는 0.3m 두께의 지반으로 가정하였으며 태양복사에 의한 영향을 고려하기 위하여 하나의 창문이 남측에 배치되어 있다. Table 1은 각 건물 부재의 물성치를 나타낸다.

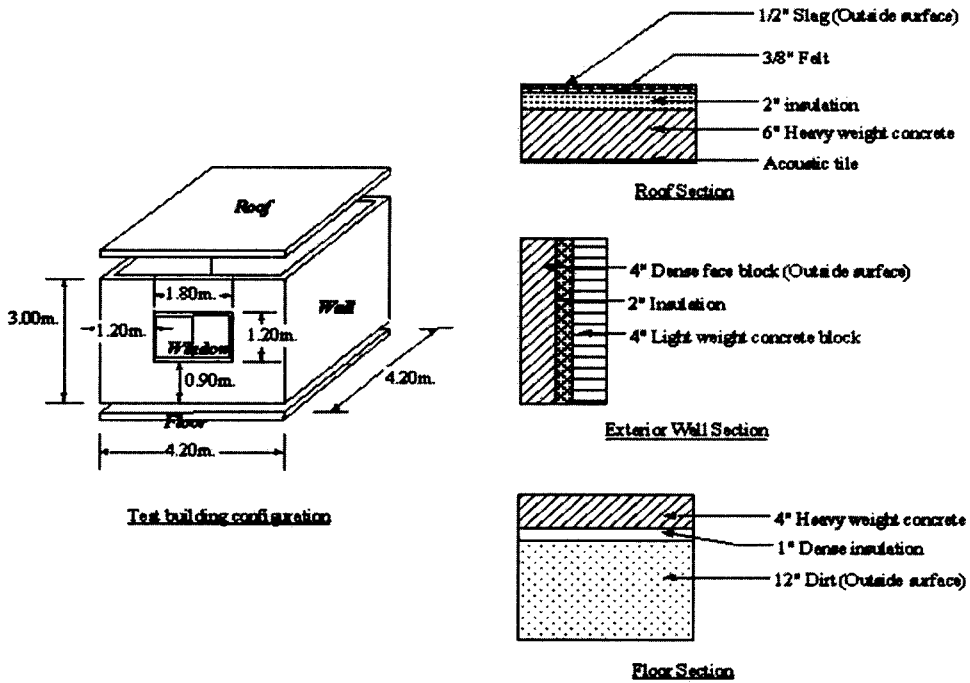


Fig. 4 The test building configuration to validate dynamic building model.

외부의 기상조건은 미국 Denver의 TMY(Typical Meteorological Year) 기상자료를 사용하였으며, 1월 21일 하루의 기후조건을 이용하여 결과를 비교하였으며 실내공조를 하지 않는 것으로 가정하여 건물의 실내온도는 외부 환경조건에 따라서 변동하게 된다.

단열재 유무의 두 조건 하에서, 1차원의 CTF를 사용한 기존의 EnergyPlus와 2차원의 Ground-

coupled 열전달 모델을 사용한 수정된 EnergyPlus를 이용하여, 두 EnergyPlus 시뮬레이션 건물 모델의 결과를 비교한다.

Fig. 5와 Fig. 6는 단열재를 바닥구조체 하부에 설치하지 않은 경우와 설치한 경우의 두 가지 경우에 대한 하루 중의 실내온도와 바닥표면 온도의 변화를 나타낸다. 그림에서 같이 두 가지 EnergyPlus 모델링을 통한 결과들은 서로 일치한

Table 1 Material properties for the test building configuration (Material library in EnergyPlus)

| | Material | Conductivity (W/m·°C) | Density (kg/m ³) | Specific heat (J/kg·°C) |
|---------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------|
| Roof | 1/2" Slag | 1.43 | 881 | 1670 |
| | 3/8" Felt | 0.19 | 1121 | 1670 |
| | 2" Insulation | 0.04 | 32.03 | 830 |
| | 6" Heavy weight concrete | 1.72 | 2242 | 830 |
| | Acoustic tile | 0.06 | 480 | 830 |
| Exterior wall | 4" Heavy weight concrete block | 0.81 | 997 | 830 |
| | 2" Insulation | 0.04 | 32 | 830 |
| | 4" Light weight concrete block | 0.38 | 608 | 830 |
| Floor | 4" Heavy weight concrete | 1.72 | 2242 | 830 |
| | 2" Rigid insulation | 0.04 | 91 | 830 |
| | 12" Dirt | 0.173 | 1041 | 830 |

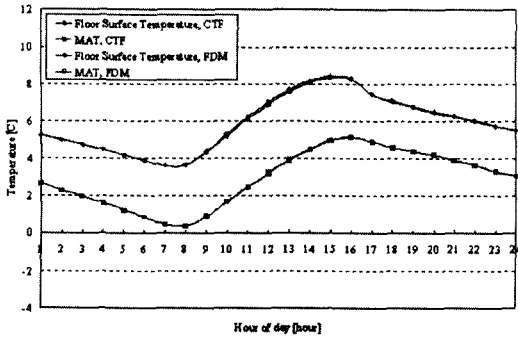


Fig. 5 Floor surface and indoor air temperature variations for an uninsulated slab.

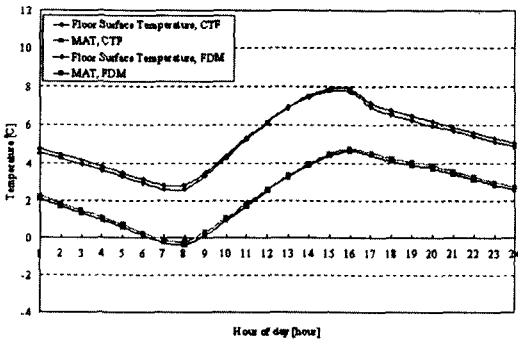


Fig. 6 Floor surface and indoor air temperature variation for a uniformly insulated slab.

다. 이는 Slab-on-grade 바닥구조체의 열전달 계산에 있어서 기존의 CTF(Conduction Transfer Function) 방법과 2차원 Ground-coupled 열전달 모델링 방법은 서로 호환됨을 알 수가 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Ground-coupled 바닥 모델의 비교

기존 EnergyPlus 프로그램은 벽과 바닥이 만나는 곳에서 생기는 열교현상을 고려하지 않는 1차원의 단순모델이 사용된다. 그러나 2차원 Ground-coupled 열전달 모델은 이를 고려하여 건물구조체에서 외부환경과 지중으로의 열전달이 미치는 영향에 대한 해석이 가능하다. Fig. 7은 1차원과 2차원 형태의 Slab-on-grade 바닥구조체를 통한 바닥구조체를 통한 열손실을 비교하였다. 여기서는 각 계절의 특성을 가지는 하루의 기후조건(4

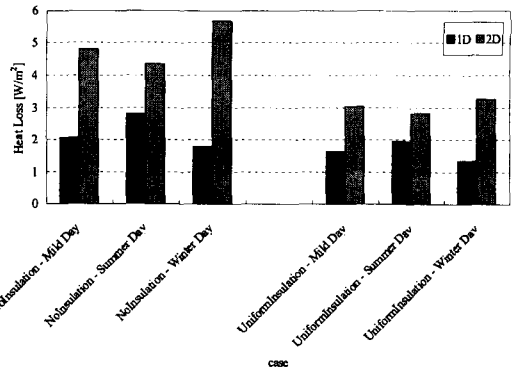


Fig. 7 Daily average building foundation heat loss without HVAC operation during three typical days in Denver.

월 21일, 8월 21일, 12월 21일)을 각각 사용하였다. 건물은 공조를 하지 않는 것으로 가정하여 건물의 실내온도는 외부 환경조건에 따라서 변화하게 된다. 1차원 모델의 지중 하부면 온도는 Denver의 기상데이터에 있는 0.5 m 지중 온도를 사용하였으며 2차원 모델은 지하 8 m 아래에서 지중 하부면 온도를 10°C로 가정하였다.

바닥단열재의 설치방법과는 무관하게 1차원 열전달 모델보다는 열교현상을 고려한 2차원 열전달 모델이 바닥을 통한 열손실이 큰 것으로 나타났다. 특히 바닥구조체 아래에 단열재를 설치하지 않았을 경우 겨울에 있어서 그 차이는 바닥면 적당 3.9 W/m²의 차이를 보였다.

3.2 계절에 따른 지중온도 분포

이 절에서는 연중 시뮬레이션(1/1~12/31)을 통하여 2차원 형태인 Slab-on-grade 바닥구조체의 시간에 따른 비정상상태(unsteady-state)의 열전달 특성을 가지는 지중의 온도분포를 보여준다. 건물의 바닥구조체 하부에 단열재를 설치하였으며 재실자의 스케줄(8~17시)에 따라서 실내온도를 23°C로 설정하여 공조를 하였다.

Fig. 8은 중간기(4월 21일)의 지중온도 분포를 나타내며, 지면으로 1.2 m 아래에는 10°C의 온도를 보이는 차가운 온도분포 영역(cold spot)이 배치되어 있다. 하절기(8월 21일)의 온도분포를 나타내는 Fig. 9는 중간기에서 보이는 차가운 온도분포 영역은 사라지고, 지반 아래부터 지표면까지 지중온도가 점차적으로 상승하고 있으며, 열전도

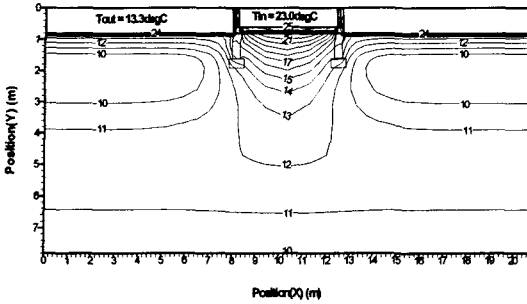


Fig. 8 Soil temperature isotherms for uniformly insulated slab during springtime (Denver, noon, April 21).

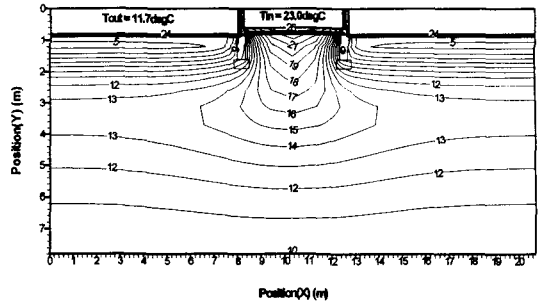


Fig. 10 Soil temperature isotherms for uniformly insulated slab during winter-time (Denver, noon, December 21).

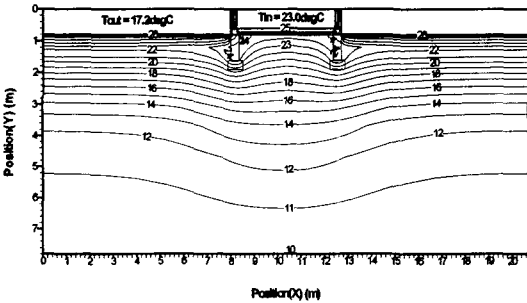


Fig. 9 Soil temperature isotherms for uniformly insulated slab during summertime (Denver, noon, August 21).

계수가 지중보다 큰 콘크리트 지하기초물의 영향으로 건물기초 부근의 온도가 바닥구조체의 밑 부분보다 크게 나타나고 있다. Fig. 10은 동절기

(12월 21일)의 지중온도 분포를 나타낸다. 바닥구조체 밑에 설치된 단열재의 영향으로 지중온도가 그 아래서 급감하는 분포를 보여주며, 바닥구조체의 가장자리 부분에서는 단열재의 설치에도 불구하고 열손실이 많은 것을 알 수 있다.

3.3 단열재 설치방법에 따른 영향

건물 바닥단열재 배치에 따른 Ground-coupled 열전달의 특성을 분석하기 위하여 Fig. 11과 같이 세 가지 종류의 단열재 배치방법을 고려하였다. 하절기(8월 21일) 및 동절기(12월 21일)의 하루의 기상조건을 각각 사용하였으며 재실자의 스케줄(8~17시)에 따라서 실내온도를 23℃로 설정하여 공조를 하였다.

Table 2는 하절기와 동절기에서 바닥구조체의

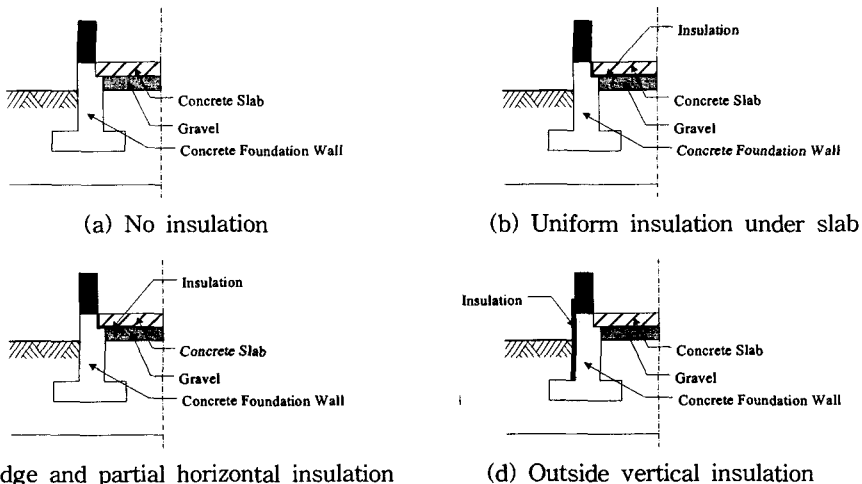


Fig. 11 Slab-on-grade floor insulation configurations.

Table 2 Foundation heat loss for four insulation configurations applied a conditioned building in Denver

| Insulation configuration | Summer (8/21) | | Winter (12/21) | |
|--------------------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
| | Heat loss [W/m ²] | Reduction [%] | Heat loss [W/m ²] | Reduction [%] |
| Un-insulated | 2.61 | 0 | 3.07 | 0 |
| Edge partial | 1.98 | 24 | 2.34 | 24 |
| Uniform | 1.92 | 26 | 2.17 | 29 |
| Outside vertical | 2.11 | 19 | 2.53 | 17 |

단열재 배치방법에 따라서 건물의 실내에서 지중으로 손실되는 단위면적당 평균 열손실량과 단열재를 설치하지 않을 경우를 기준으로 한 열손실량을 퍼센트로 나타내었다.

바닥구조체의 하부에 단열재를 전체적으로 설치하거나, 바닥구조체의 가장자리로부터 1m까지 주변부에 부분적으로 단열재를 설치할 경우는 단열재를 사용하지 않았을 경우보다 열손실이 많이 줄일 수 있다. 특히 바닥구조체 하부에 전체적으로 단열재를 설치하였을 경우 열손실이 가장 적게 나타났으며, 동절기에는 29%의 열손실을 줄일 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 2차원의 비정상상태를 고려한 Ground-coupled 열전달 모델링을 하고 이를 EnergyPlus 프로그램에 연계시켜서 지중온도분포 및 단열재 배치방법에 따른 건물의 열손실을 고찰하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 건물 바닥구조체의 단열과는 무관하게 기존 EnergyPlus의 1차원 열전달 모델보다는 열교현상을 고려한 2차원 Ground-coupled 열전달 모델을 사용할 경우 건물에서 지중으로의 열손실이 더 큰 것으로 나타났다. 특히 바닥구조체 하부에 단열재를 설치하지 않았을 경우 동절기에 있어서 열손실은 단위면적당 3.9 W/m²만큼 증가하였다.

(2) 바닥구조체 하부에 설치된 단열재의 영향으로 동절기에는 지중온도가 단열재의 하부에서 급감하며, 바닥구조체의 가장자리 부분에서는 단열재의 설치에도 불구하고 지중으로의 열손실이 큰 것으로 나타났다.

(3) 건물의 바닥구조체의 하부에 단열재를 전체적으로 설치하거나, 가장자리로부터 1m까지 부

분적으로 설치할 경우 지중으로의 열손실을 많이 줄일 수 있다. 특히 단열재를 전체적으로 설치하였을 경우 동절기에는 29%의 열손실을 줄일 수 있다.

본 연구는 지중열전달 모델링 개발을 목적으로 수행하였다. 그러나 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하기 위하여 향후 이 결과를 실험을 통해서 얻은 결과와 비교 검증하는 지속적인 연구가 수행되어야 한다.

참고문헌

- Jensen, M. E., 1973, Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements, ASCE, New York.
- Krarti, M., 2000, Foundation Heat Transfer, Chapter in Advance in Solar Energy, Vol. 13, ASES, Boulder.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J. and Glazer, J., 2001, Energy-Plus: Creating a new-generation building energy simulation program, Energy and Buildings, Vol. 33, pp. 319-331.
- Claridge, D., 1988, Design Methods for Earth-Contact Heat Transfer, Progress in Solar Energy, American Solar Energy Society, Boulder, CO.
- Sterling, R. and Meixel, G., 1981, Review of Underground Heat Transfer Research, Earth Sheltered Performance and Evaluation Proceedings, Second Technical Conference, pp. 67-74.

6. Krarti, M., Claridge, D. E. and Kreider, J. F., 1990, The ITPE method applied to time-varying three-dimensional ground-coupling problems, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, No. 4, pp. 849-856.
7. Krarti, M., Nicoulin, V., Claridge, D. E. and Kreider, J. F., 1995, Comparison of energy prediction of three ground-coupling heat transfer calculation methods, *ASHRAE Transactions*, Vol. 101, Pt. 1.
8. McClellan, T. M. and Pedersen, C. O., 1997, Investigation of outside heat balance models for use in a heat balance cooling load calculation procedure, *ASHRAE Transactions*, Vol. 103, Pt. 2.
9. Bahnfleth, W. P., 1989, Three-Dimensional Modelling of Heat Transfer from Slab Floors, thesis, University of Illinois at Champaign-Urbana, IL, USA.
10. Kusuda, T. and Achenbach, P. R., 1965, Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the united states, *ASHRAE Transactions*, Vol. 71, Pt. 1, pp. 61-75.
11. Bahnfleth, W. P. and Pedersen, C. O., 1990, A three-dimensional numerical study of slab-on-grade heat transfer, *ASHRAE Transactions*, Vol. 96, Pt. 2, pp. 61-72.
12. Pantankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York, Hemisphere.
13. SIAM, 1993, *LAPACK User's guide V2.0*, Philadelphia, Pennsylvania.