

## 에너지 슬래브의 열-역학적 수치해석 모델 개발

### Development of Thermomechanical Coupled Numerical Model for Energy Slab

박 상 우<sup>1</sup> Park, Sangwoo  
최 항 석<sup>2</sup> Choi, Hangseok  
이 석 재<sup>3</sup> Lee, Seokjae

#### Abstract

In this study, a thermomechanical numerical model was developed to evaluate the stability of energy slabs. First, a wall-type energy slab was installed in a residential underground parking lot, and thermal performance tests were conducted. Based on the tests, a numerical thermohydraulics model of the energy slab was developed to accurately simulate the thermal behavior in thermal performance tests. Finally, utilizing the temperature data acquired using the developed model, a thermomechanical numerical model of the energy slab was established. The thermomechanical model was then used to simulate the thermal stresses induced by operating the energy slab. The results demonstrated a maximum thermal stress of 5,300 kPa, which highlights the need to utilize cement mortar with sufficient tensile strength to realize stable operation of the energy slab.

#### 요 지

본 연구에서는 에너지 슬래브의 안정성을 검토하기 위해 열-역학적 수치해석 모델을 개발하였다. 먼저, 주거용 건물 지하주차장에 벽체형 에너지 슬래브를 설치한 뒤 현장 열성능 평가시험(Thermal performance test, TPT)을 수행하였다. 이를 기반으로 현장 열성능 평가시험의 열-수리학적 거동을 정교하게 모사할 수 있는 에너지 슬래브의 열-수리학적 수치해석 모델을 개발하였다. 마지막으로, 열-수리학적 모델을 통해 도출된 시간-온도 데이터를 기반으로 에너지 슬래브의 열-역학적 수치해석 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 기반으로 에너지 슬래브의 운용에 따른 열응력을 산정한 결과 최대 5,300kPa의 열응력이 발생하였으며, 이는 에너지 슬래브의 안정적인 운용을 위해 충분한 인장강도가 확보된 시멘트 몰탈 활용이 필요하다는 것을 시사한다.

**Keywords** : Energy slab, Ground heat exchanger (GHEX), Numerical model, Thermal performance test (TPT), Thermal stress

1 정희원, 육군사관학교 토목환경학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg. and Environmental Sciences, Korea Military Academy)

2 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정희원, 군산대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kunsan National Univ., Tel: +82-63-469-4757, Fax: +82-63-469-4757, seokjae@kunsan.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

지열 냉난방 시스템(Ground source heat pump system)은 건물의 냉난방에 활용되는 히트펌프의 열원을 지반으로부터 획득하는 시스템이다. 냉방을 수행할 경우 히트펌프로부터 순환수가 지반에 설치된 지중열교환기(Ground heat exchanger)로 공급되어 지반과의 열교환을 통해 열을 방출한 뒤 다시 히트펌프로 돌아와 냉방시 발생하는 지열 냉난방 시스템의 전력 소모량을 감소시킨다. 반대로 난방을 수행할 경우, 지반의 온도에 비해 상대적으로 낮은 온도의 순환수가 히트펌프에서 지중열교환기로 공급되어 지반으로부터 열을 획득한다. 대한민국은 사계절이 뚜렷하며, 지반의 온도가 일정 깊이 이하에서는 연중 15°C로 유지된다. 따라서, 높은 효율로 지열 냉난방 시스템을 운용할 수 있는 것으로 평가되어 기술 보급을 위한 연구가 진행된 바 있다(Kim et al., 2019). 지열 냉난방 시스템에서 순환수와 지반 사이의 열교환을 유도하는 지중열교환기로는 수직밀폐형 지중열교환기가 일반적으로 널리 사용되고 있다. 하지만 수직밀폐형 지중열교환기는 150-200m의 천공 깊이를 가지고 있어 전체 지열 냉난방 시스템 시공비의 약 50%를 차지하는 과도한 시추비용을 감당해야 하며, 시공을 위한 추가 공사부지가 요구되고 있다(Boënnec, 2008). 이로 인해 지열 냉난방 시스템은 높은 초기 투자비용이 발생되고 있으며, 최근 이를 극복하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다(Desmedt et al., 2012; Kim et al., 2017; Zhao et al., 2016).

지표면 아래에 설치되는 토목구조물(말뚝, 지하공간 벽체 및 슬래브, 흙막이, 터널라이닝 등) 내부에 열교환 파이프를 삽입하여 토목구조물과 지중열교환기가 접목된 에너지 구조체로 활용하는 기술은 지열 냉난방 시스템에 요구되는 높은 초기 투자비용을 획기적으로 낮추는 방법으로써 가장 활발히 연구되고 있다(Choi, 2012; Lee et al., 2016; Park et al., 2018). 대표적으로 에너지 파이프는 구조물 지지용 말뚝에 열교환 파이프를 삽입하는 형태로 구성되며, 강관, PHC, 현장타설 말뚝 등을 활용하여 설치할 수 있다. 하지만, 말뚝 기초의 설치 깊이는 일반적으로 50m 미만이기 때문에 기존 수직밀폐형 지중열교환기에 비해 시추공 깊이가 얕을 수밖에 없다. 즉, 에너지 파이프는 시추공 내에 설치할 수 있는 열교환 파이프 길이가 수직밀폐형 지중열교환기에 비해 상당히 짧기 때문에 지열 냉난방 시스템의 열부하를 직접적

으로 감당하기 위해서는 많은 수의 에너지 파이프 설치가 필요하다는 단점이 있다. 이에 일반적인 말뚝에 비해 직경이 3배 이상 큰(직경 1,500mm 이상) 대구경 현장타설 말뚝을 활용하여 많은 수의 열교환 파이프를 삽입하는 방식에 대해 연구된 바 있으며, 현장시험 결과 수직밀폐형 지중열교환기와 유사한 열성능을 가지는 것으로 평가되었다(Park et al., 2017). 또다른 에너지 구조체인 에너지 슬래브는 지중열교환기를 건물의 바닥 또는 벽체 슬래브에 수평방향으로 삽입한 형태이다. 하지만 에너지 슬래브는 천부지반의 바닥 슬래브를 활용하므로 외기의 영향이 크고 지반의 열전도도도 낮아 수직밀폐형 지중열교환에 비해 낮은 열성능을 가지는 것으로 평가된다(Moon and Choi, 2015). Lee et al.(2018)은 에너지 슬래브에 단열층을 구성하여 외기온도의 영향을 낮추는 방법을 현장시험을 통해 검증하였으며, 단열층 유무에 따라 에너지 슬래브의 열성능이 크게 차이가 나는 것을 확인하였다. 추가적으로 해당 현장 시험 결과를 통해 개발된 수치해석 모델을 통해 단열층에 설치되는 최적 단열재료를 제시하였다(Lee et al., 2021). 그러나 문제는 에너지 슬래브와 지반 간의 열교환으로 인해 열교환 파이프는 팽창과 수축을 반복하고 결과적으로 콘크리트 내부에 열응력을 발생시킨다. 특히, 슬래브를 시공할 때는 일반적으로 인장력에 취약한 시멘트 몰탈이 활용되기 때문에 반복되는 온도 변화에 따라 발생하는 열응력은 에너지 슬래브의 구조적 안정성을 위협할 수 있다. 따라서, 일반 건물에 에너지 슬래브가 적용되기 위해서는 에너지 슬래브의 열-역학적 거동 규명이 반드시 선행되어야 한다.

본 연구에서는 주거용 건물의 지하주차장 벽면에 에너지 슬래브를 설치하고 현장 열성능 평가시험을 수행하였다. 그 후 현장시험 결과에 기반하여 에너지 슬래브의 열-수리학적 거동을 예측할 수 있는 수치해석 모델을 개발하였다. 개발된 열-수리학적 모델의 시간에 따른 온도변화 조건을 적용하여 에너지 슬래브의 열-역학적 거동을 수치해석 기법으로 모사하였으며, 이를 통해 현장에 시공된 에너지 슬래브의 열-역학적 안정성을 검토하고 에너지 슬래브의 활용 가능성을 평가하였다.

## 2. 에너지 슬래브 현장 열성능 평가시험

### 2.1 에너지 슬래브 시험 시공

Fig. 1은 본 연구에서 현장에 설치된 에너지 슬래브의

개략도를 나타낸다. 에너지 슬래브는 주거용 건물의 지하주차장 벽면에 설치되어 지반과의 열교환을 유도하도록 설계되었으며, 열교환 파이프는 벽면의 면적을 고려하여 총 55m의 길이로 설치하였다. 열교환 파이프의 간격은 시공의 편의를 위해 직경 25mm HDPE(High density polyethylene) 파이프의 곡률반경을 고려하여 400mm로 설치하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 에너지 슬래브에서 열교환 파이프는 수평형으로 설치되기 때문에 대기와의 접촉 면적이 일반적인 수직밀폐형 지중열교환기에 비해 매우 크다. 즉, 대기 온도변화에 의해 에너지 슬래브의 열성능이 저하될 수 있으며, 따라서 에너지 슬래브에서 단열층 설치하는 필수적이다. Lee et al.(2021)에 따르면 PF Board와 유사한 열전도도를 가진 단열재가 최적의 단열재인 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 플라스틱 형태의 PF Board를 대체하여 유사한 단열 성능을 가지는 에어로젤(Aerogel)을 활용하여 단열층을 구성하였다. 추가적으로 본 현장의 에너지 슬래브는 모서

리 부분이 건물에 구속되어 에너지 슬래브의 온도변화로 인해 발생하는 열팽창 및 수축은 에너지 슬래브의 중앙 부분에서 가장 클 것으로 예상되었다. 따라서, 에너지 슬래브의 중심(Fig. 1a의 A)에 온도 센서를 삽입하여 콘크리트 슬래브의 대표 온도로 설정하고 에너지 슬래브의 열-역학적 수치해석 모델 개발에 활용하였다.

## 2.2 현장 열성능 평가시험 결과

현장 열성능 평가시험은 지중열교환기의 열성능을 간접적으로 평가할 수 있는 시험방법으로, 선형 열원을 가지지 않아 열응답 시험을 통해 열전도도를 산정할 수 없는 에너지 슬래브, 에너지 파이프 등의 열성능을 평가하기 위해 주로 활용된다(Park et al., 2017; Lee et al., 2018; Lee et al., 2023). 지열 냉난방 시스템에서는 히트 펌프에서 건물의 냉난방 부하에 따라 일정 온도의 순환수를 지중열교환기로 공급하여 지반과 열을 교환한다.

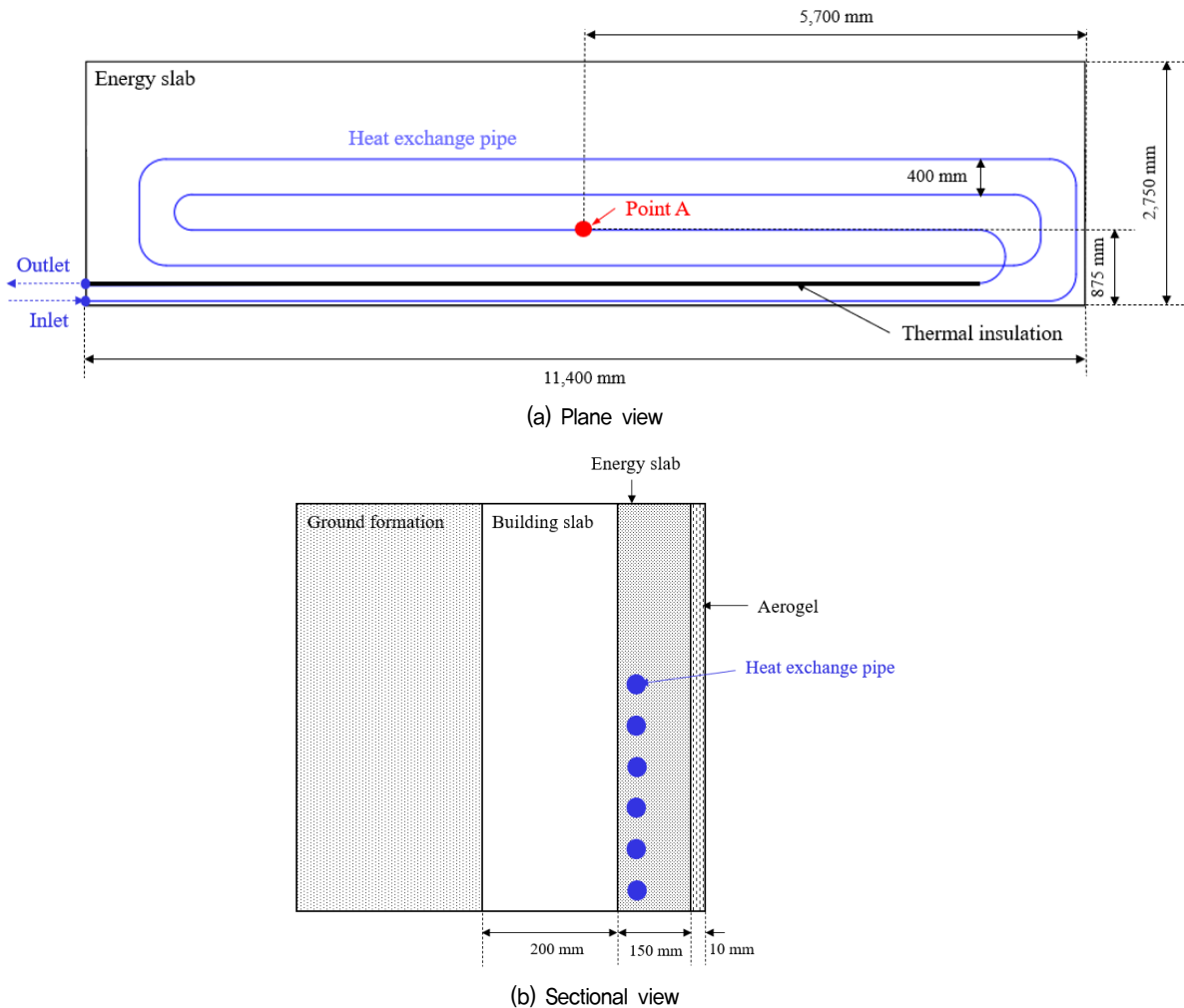


Fig. 1. Schematic diagram of constructed energy slab

현장 열성능 평가시험에서는 해당 과정을 히트펌프가 아닌 항온수조를 통해 재현한다. 즉, 항온수조를 통해 일정 온도의 순환수를 지중열교환기로 공급하고 유출수 온도를 측정하여 식 (1)을 통해 지중열교환기의 열교환량을 산정한다(Lee et al., 2023).

$$Q_{avg} = C \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \quad (1)$$

여기서,  $C$ 는 순환수의 비열( $J/(kg \cdot K)$ ),  $\dot{m}$ 는 순환수의 질량유속( $kg/s$ ),  $\Delta T$ 는 유입수와 유출수의 온도차이( $K$ )를 의미한다.

본 연구에서는 시험이 여름에 진행되었기 때문에 냉방조건(즉, 유입수 온도  $30^{\circ}C$ )으로 시험을 진행하였다. 또한, 일반 상업건물에 사용되는 지열 냉난방 시스템과 유사한 가동조건을 적용하기 위해 항온수조에 내장된

전원 공급 제어장치를 활용하여 8시간 가동 16시간 휴식의 간헐적 가동을 모사하였다. 여기서, 순환수의 유량은 현장에 설치된 HDPE 파이프(직경 25mm)를 고려하여 열교환 파이프 내에서 난류흐름을 유도할 수 있는 최소 유량 이상인 7.5L/min으로 설정하였다(Lee et al., 2023).

Fig. 2는 현장 열성능 평가시험 설계도 및 전경을 나타낸다. 에너지 슬래브의 열교환량을 계산하기 위해 온도센서를 에너지 슬래브 순환수 입출구 부분에 설치하였으며, 유량계를 통해 시험 간 유량공급을 확인하였다(Lee et al., 2018).

현장 열성능 평가시험 결과는 Fig. 3과 같다. 시험 간 입출구 순환수 온도차는 평균  $1.77^{\circ}C$ 로 나타났으며, 식 (1)을 통해 산정된 에너지 슬래브의 평균 열교환량은 906W로 계산되었다.

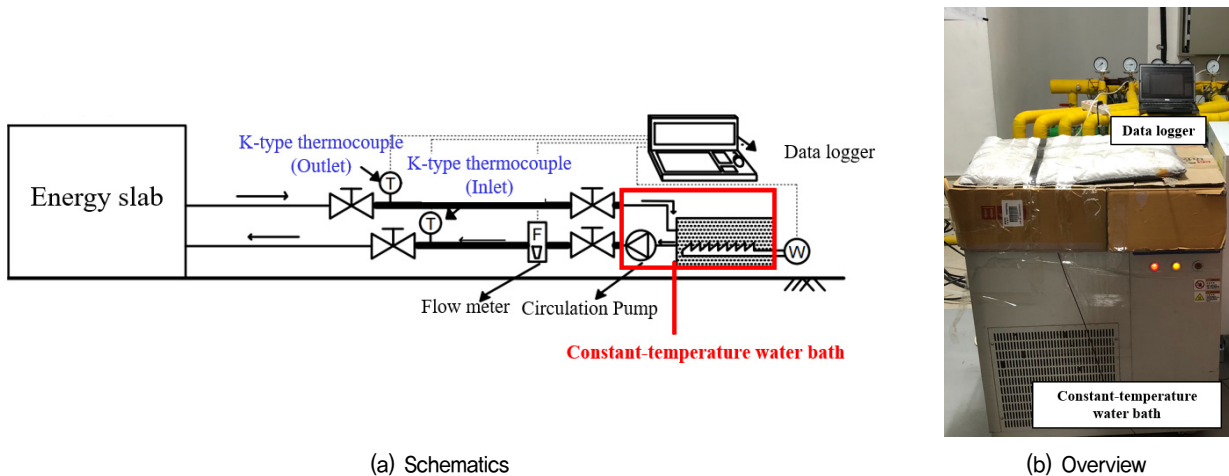


Fig. 2. Schematics and overview of thermal performance test for energy slab

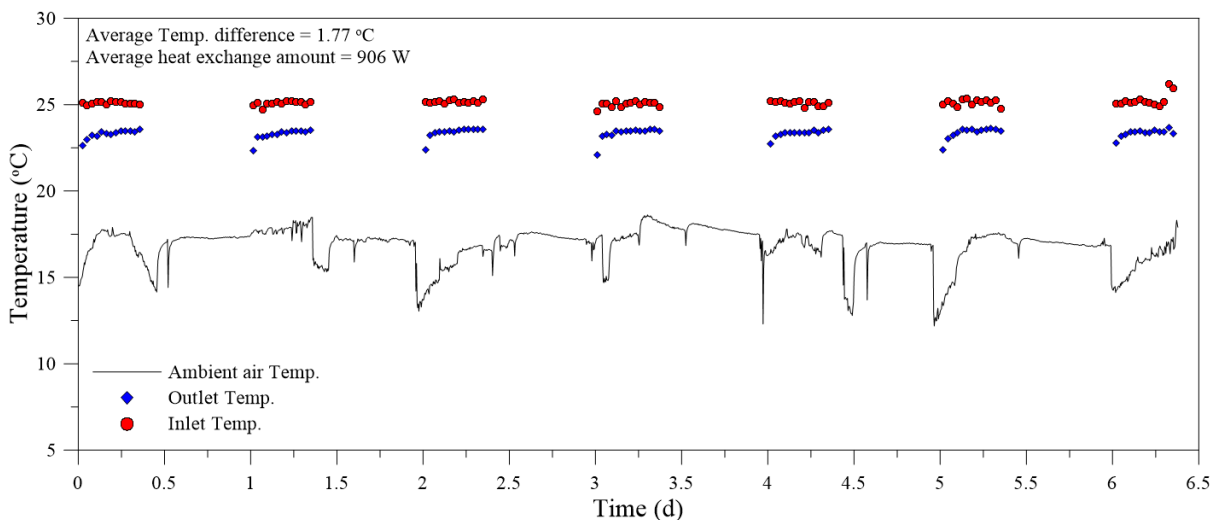


Fig. 3. Thermal performance test results

단위 파이프 길이당 열교환량은 16.47W/m로, 유사한 구조를 가지는 기존 연구의 에너지 슬래브(5.05W/m)에 비해 약 3.3배 높은 열성능을 보이는 것으로 나타났다(Lee et al., 2018). 이는 에너지 슬래브를 지하 주차장에 설치하여 외기온도의 영향을 상당 부분 차단하였기 때문이다. 따라서, 본 현장과 같이 외기온도가 차단된 주거용 건물 지하주차장에 에너지 슬래브를 설치하여 냉난방을 수행할 경우 지열 에너지를 안정적으로 활용하여 우수한 성능으로 지열 냉난방 시스템을 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 에너지 슬래브 열-역학적 수치해석 모델 개발

#### 3.1 열-수리학적 수치해석 모델 개발

본 연구에서는 상용 유한요소해석(Finite element method, FEM) 프로그램인 COMSOL Multiphysics를 활용하여 열-수리학적 모델과 열-역학적 모델을 개발하였다. 먼저 열-수리학적 모델에 사용된 순환 유체와 주변 매질(열교환 파이프, 콘크리트 및 지반) 사이의 열 대류 및 전도에 의해 유도된 에너지 및 질량 보존에 대한 지배 방정식은 식 (2)와 같다(Park et al., 2017; COMSOL, 2018).

$$\rho AC \frac{\partial T}{\partial t} + \rho AC u \nabla T = \nabla A k \nabla T + f_d \frac{\rho A}{2d_h} |u|^3 + Q + Q_{wall} \quad (2)$$

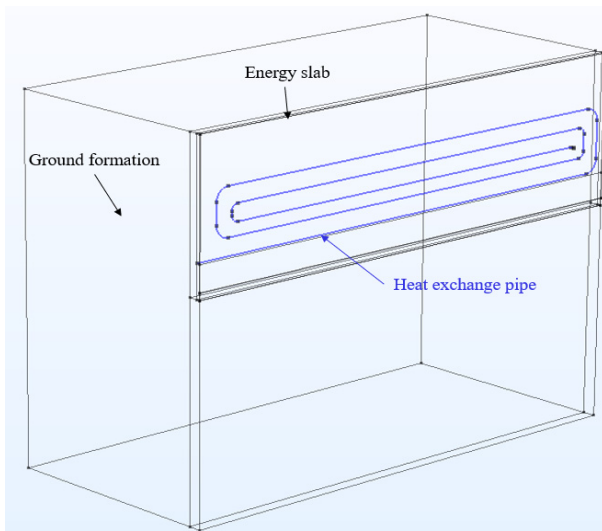
여기서,  $A$ 는 열교환 파이프의 단면적( $m^2$ ),  $T$ 는 순환수의 온도( $K$ ),  $u$ 는 접선속도( $m/s$ ),  $k$ 는 순환수의 열전도도( $W/m \cdot K$ ),  $f_d$ 는 순환수의 Darcy 마찰계수,  $d_h$ 는 평균 수력직경( $m$ ),  $Q$ 는 열원으로부터 공급되는 열량( $W$ ), 그리고  $Q_{wall}$ 는 주변 매질과 순환수 사이에 열교환을 나타내는 열원항( $W$ )을 나타낸다.

이때,  $Q_{wall}$ 는 뉴턴의 냉각법칙에 따라 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다(COMSOL, 2018).

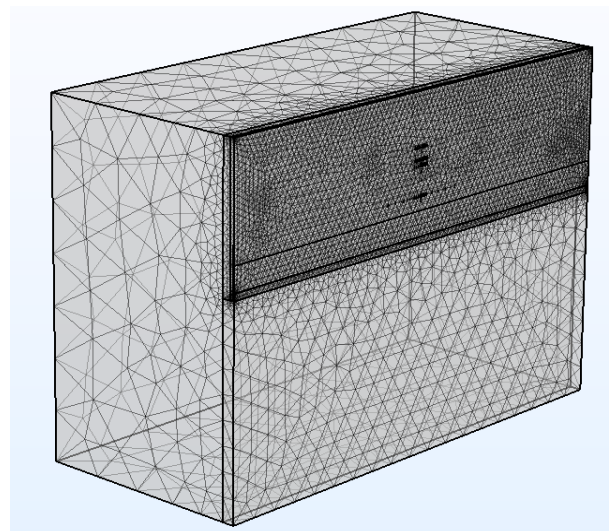
$$Q_{wall} = hZ(T_{ext} - T) \quad (3)$$

여기서,  $h$ 는 열교환 파이프의 열전달계수( $W/m^2 \cdot K$ ),  $Z$ 는 열교환 파이프의 둘레( $m$ ), 그리고  $T_{ext}$ 는 열교환 파이프 외부의 온도( $K$ )를 나타낸다.

에너지 슬래브에 설치된 열교환 파이프를 수치해석 모델에 격자 요소로 재현할 경우, 격자 수가 기하급수적으로 증가하여 해석 시간이 증가되며 수렴성이 감소된다. 따라서 본 연구에서는 COMSOL Multiphysics에 내장되어 있는 파이프 모듈(Pipe flow module)을 활용하여 열교환 파이프를 선으로 묘사하였다. 파이프 모듈에서는 층류 및 난류의 흐름, 뉴턴 유체와 비뉴턴 유체, 다양한 단면 형상, 광범위한 상대 표면 거칠기 값을 포함한 전체 흐름 영역이 모듈에 내재된 Darcy friction factor를 통해 구현된다(COMSOL, 2018). 지중열교환기 수치해석과 관련된 다양한 연구에서 해당 모듈을 활용하여 열교환 파이프의 흐름 및 열전달을 해석한 바 있다



(a) Geometry



(b) Mesh configuration

Fig. 4. Geometry and mesh configuration of thermal-hydraulic numerical model for energy slab



(Park et al., 2017; Lee et al., 2021; Lee et al., 2023). Fig. 4는 개발된 에너지 슬래브의 열-수리학적 수치해석 모델의 기하학적 형상 및 격자 형상을 나타낸다. 격자 요소의 크기는 상대적으로 온도 차이가 크게 발생하지 않는 지반 부분은 크게 설정하였으며, 에너지 슬래브 부근으로 갈수록 줄어들게 설정하였다. 특히, 열교환 파이프 부근의 격자 요소의 한 변의 길이는 0.734m로 가장 작게 설정하여 해석 정확성을 높였다. 이에 총 144,630 개의 사면체 요소로 구성되어 있으며, 격자 요소들의 평균 품질은 0.52로 에너지 슬래브의 열-수리학적 거동을 해석하기에 적절한 것으로 판단된다(COMSOL, 2018).

해석 모델에 적용된 물성치는 Table 1과 같다. 일반적으로 지중열교환기의 열성능에 가장 큰 영향을 미치는 지반의 열전도도는 KD2-pro를 활용하여 현장에서 측정하였다. 한편, 콘크리트의 열전도도는 현장에 타설된 콘크리트와 동일한 재료와 배합비로 실내에서 양생한 뒤 QTM-500을 활용하여 측정하였다. 이외의 물성치는 기존 문헌을 참고하여 가정하였으며, 열교환 파이프 및 에어젤의 물성치의 경우 제조사의 제품사양을 참조하

였다(Waples and Waples, 2004; Hamdhan and Clarke, 2010; Asadi et al., 2018).

개발된 열-수리학적 수치해석 모델을 검증하기 위해 현장 열성능 평가시험에서 측정된 유입수 온도 및 외기 온도를 수치해석 모델에 경계조건으로 부여한 후 지반과의 열교환을 해석적으로 모사하여 산정되는 유출수의 온도를 현장시험에서 측정된 유출수 온도와 비교하였다. 또한, Fig. 1a의 A점에 설치된 온도센서에서 측정된 슬래브의 온도변화와 수치해석을 통해 동일한 위치에서 산정한 온도변화를 비교하였다. Fig. 5a는 수치해석을 통해 산정된 유출수 온도변화와 현장시험에서 측정된 유출수 온도변화를 비교한 그래프이며, 결과적으로 오차율 및 RMSE(Root mean square error)는 각각 0.1% 및 1.16°C로 나타났다. 또한, Fig. 5b에 도시된 바와 같이 A점에서의 현장시험과 수치해석 모델 간의 오차율 및 RMSE는 1.75% 및 0.41°C로 계산되어 개발된 열-수리학적 수치해석 모델은 현장의 에너지 슬래브의 열성능과 매질의 온도변화를 정교하게 모사할 수 있는 것으로 판단되었다.

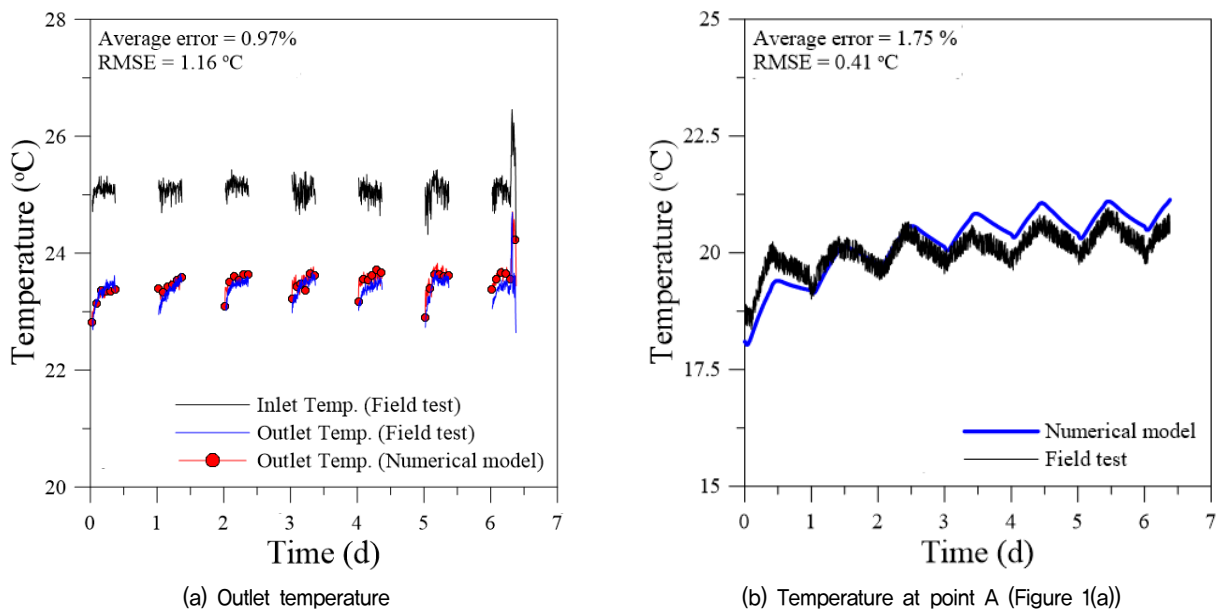


Fig. 5. Comparison between field test and numerical model

Table 1. Applied properties in thermal-hydraulic model for energy slab

Thermal properties	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat capacity (J/kg · K)	Thermal conductivity (W/m · K)
Cement mortar	2,300	800	1.9
Ground formation	2,100	1,300	1.206
Aerogel	150	1,800	0.018
Heat exchange pipe (HDPE)	-	2,302	0.4

### 3.2 열-역학적 수치해석 모델 개발

본 연구에서는 에너지 슬래브의 열-수리학적 모델을 통해 계산된 에너지 슬래브의 시간당 온도변화 데이터를 열-역학적 모델의 시간당 경계조건으로 부여한 후 Fig. 1a의 A점에서의 시간당 열응력 변화를 계산하였다. 이에 열-수리학적 수치해석 모델의 기하학적 형상 및 격자 형상을 동일하게 사용하였으며, 고체역학 및 열팽창 모듈이 결합된 다중물리현상 모듈을 모델에 적용하였다(COMSOL, 2018). 열-역학적 수치해석 모델에서 열응력을 계산할 경우 가장 큰 영향을 미치는 것은 열팽창 계수로, 에너지 슬래브의 열응력을 계산하기 위해서는 적합한 열팽창 계수 설정이 필요하다. 수치해석 모델에 적용된 물성치는 Table 2와 같으며, 지반 물성치는 기존 문헌을 참고하여 물성치를 설정하였다(Romagnoli et al., 2003; Delage, 2013). 콘크리트와 에어로젤의 물성치는 제조사의 제품 사양을 참조하였다(Table 2).

Fig. 6은 에너지 슬래브의 열-역학적 모델의 경계조건을 나타낸다. 시간에 따른 경계 및 매질의 온도는 열-수리학적 해석으로부터 도출된 값을 그대로 적용하였다.

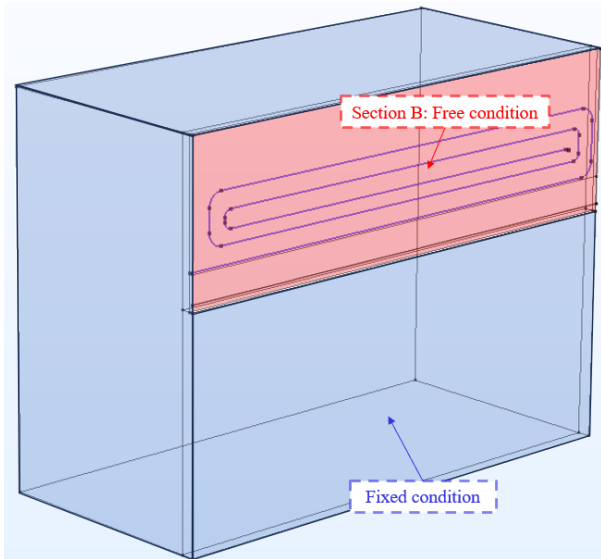


Fig. 6. Applied boundary condition in thermal–mechanical model for energy slab

역학적 해석에 필요한 경계조건인 경우 지하공간 방향인 Fig. 6의 B 부분은 자유단으로 설정하였으며, 이를 제외한 모든 부분을 고정조건으로 부여하였다.

Fig. 7은 에너지 슬래브의 시간에 따른 온도변화 및 열-역학적 해석 모델로부터 도출된 열응력 변화를 나타낸다. 열응력은 에너지 슬래브의 운용에 따라 점차 증가하는 경향을 나타냈으며, 7일간 최대 열응력은 약 1,800kPa로 계산되었다. 또한, 열-역학적 모델에서 4일과 7일 가동 이후에 발생된 열변형률에 대한 분포를 출력한 결과(Fig. 8), 순환수가 외부로부터 최초로 유입되는 열교환 파이프 부근에서 가장 큰 열 변형률이 발생되었으며, 이때 열응력은 약 5,300kPa로 산정되었다. 이는 순환수의 온도와 주변 매질의 온도차가 열교환 파이프 부근에서 가장 크기 때문이다.

선행연구에 따르면, 콘크리트의 압축강도 및 인장강도는 시멘트 몰탈의 특성에 따라 결정된다. 다만, 시멘트 몰탈의 인장력의 강도는 일반적으로 2,000kPa 이하인 것으로 보고된 바 있다(Chen et al., 2013; Singh et al., 2015). 즉, 시간에 따라 열응력이 축적되는 에너지 슬래브의 열-역학적 특성상 장기간 거동 후에는 2,000kPa보다 열응력이 높아져 에너지 슬래브의 구조적 안정성이 위협받을 수 있다. 특히, 순환수가 유입되는 열교환

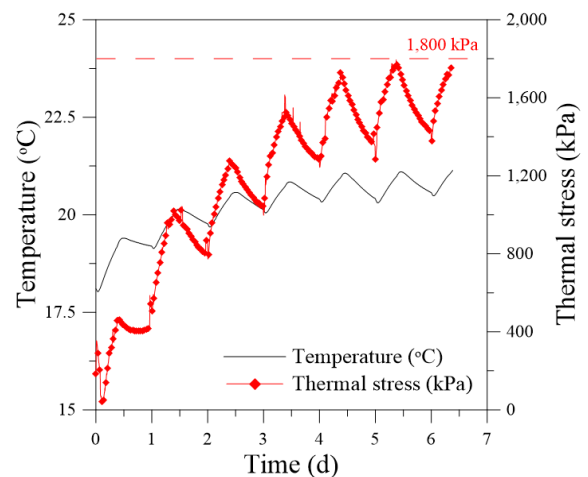
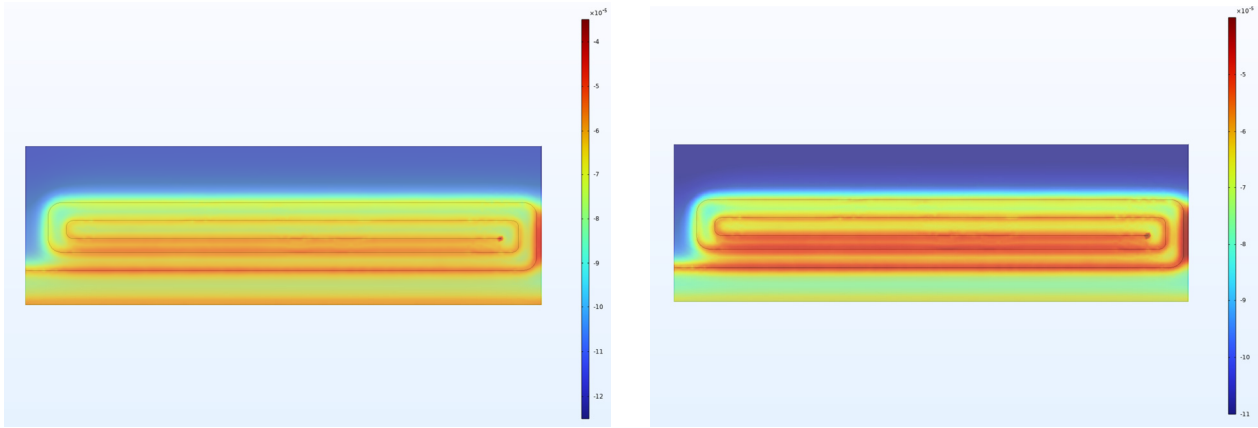


Fig. 7. Variation of thermal stress according to time

Table 2. Applied properties in thermal–mechanical model for energy slab

Type	Coefficient of thermal expansion (1/K)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio
Cement mortar	$1.0 \times 10^{-6}$	25,000	0.2
Ground formation	$2.0 \times 10^{-5}$	30	0.3
Aerogel	$1.2 \times 10^{-7}$	3	0.2



(a) After 4 d

(a) After 7 d

Fig. 8. Thermal strain distribution of thermal-mechanical numerical model

파이프 부근은 순환수와 콘크리트 사이의 온도 차이가 크기 때문에 해당 위치에서 콘크리트 균열이 발생할 가능성이 가장 높다. 따라서, 에너지 슬래브의 안정적인 운용을 위해 충분한 인장강도가 확보된 시멘트 몰탈 활용이 필요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 주거용 건물 지하주차장에 설치된 에너지 슬래브에 대한 현장 열성능 평가시험을 수행하였다. 이를 기반으로 에너지 슬래브의 열-역학적 수치해석 모델을 개발한 뒤 에너지 슬래브의 운용에 따른 구조적 안정성을 검토하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 현장 열성능 평가시험 결과, 지하주차장에 설치된 에너지 슬래브는 외기온도의 영향이 상당히 완화되어 16.47W/m의 단위 파이프 길이당 열교환량을 가지는 것으로 나타났으며, 이는 유사한 구조를 가지는 기존 에너지 슬래브에 비해 약 3.3배 높은 열성능으로 분석되었다.
- (2) 현장시험을 기반으로 에너지 슬래브의 열-수리학적 수치해석 모델을 개발하였다. 수치해석을 통해 지반 매질과 열교환 후 변화한 유출수 온도를 도출하였으며, 현장시험 데이터와 비교한 결과 오차율 및 RMSE는 각각 0.1%와 1.16°C로 나타났다. 추가적으로 에너지 슬래브 중앙 부분의 온도변화를 모사하여 현장시험 데이터와 비교하였으며, 오차율 및 RMSE는 각각 1.75%와 0.41°C로 나타났다. 즉, 개발된 에

너지 슬래브의 열-수리학적 수치해석 모델은 에너지 슬래브의 열교환 거동을 높은 정확도로 모사할 수 있는 것으로 평가되었다.

- (3) 에너지 슬래브의 열-수리학적 수치해석 모델을 기반으로 열-역학적 수치해석 모델을 개발하였으며, 현장과 동일한 조건으로 7일간 열교환 시 에너지 슬래브에서 발생하는 열응력 변화를 모사하였다. 시뮬레이션 결과, 최대 열응력은 5,300kPa으로 나타났다. 일반적인 시멘트 몰탈의 인장강도를 고려한다면 에너지 슬래브의 지속적 운용으로 축적되는 열응력은 에너지 슬래브의 구조적 안정성을 저해할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서, 에너지 슬래브 시공 시 충분한 인장강도가 확보된 시멘트 몰탈 활용이 필요하다는 결론이다.

#### 감사의 글

본 연구는 2023년도 군산대학교 신임교수 연구비 지원 및 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2023RIS-008).

#### 참고문헌 (References)

1. Asadi, I., Shafiqh, P., Hassan, Z. F. B. A., and Mahyuddin, N. B. (2018), Thermal Conductivity of Concrete-A Review, *Journal of Building Engineering*, Vol.20, pp.81-93.
2. Boënnec, O. (2008), Shallow Ground Energy Systems, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, Vol.161, No.2, pp. 57-61.



3. Chen, X., Wu, S., and Zhou, J. (2013), Influence of Porosity on Compressive and Tensile Strength of Cement Mortar, *Construction and Building Materials*, Vol.40, pp.869-874.
4. Choi, J. M. (2012), Heating and Cooling Performance of a Ground Coupled Heat Pump System with Energy-slab, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.24, No.2, pp.196-203.
5. Comsol, A. B. (2018), Heat Transfer Module User's Guide, COMSOL Multiphysics R, Stockholm, Sweden, 5.
6. Delage, P. (2013), On the Thermal Impact on the Excavation Damaged Zone around Deep Radioactive Waste Disposal, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.5, No.3, pp.179-190.
7. Desmedt, J., Van Bael, J., Hoes, H., and Robeyn, N. (2012), Experimental Performance of Borehole Heat Exchangers and Grouting Materials for Ground Source Heat Pumps, *International Journal of Energy Research*, Vol.36, No.13, pp.1238-1246.
8. Gim, Y. S., Ryu, H. G., and Choi, S. H. (2019), A Study on Service Development of Geothermal Energy Supply Diffusion Using Open Data, *J of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.31, No.7, pp.302-311.
9. Hamdhan, I. N. and Clarke, B. G. (2010, April), Determination of Thermal Conductivity of Coarse and Fine Sand Soils, In Proceedings of world geothermal congress (pp.1-7).
10. Kim, D., Kim, G., Kim, D., and Baek, H. (2017), Experimental and Numerical Investigation of Thermal Properties of Cement-based Grouts Used for Vertical Ground Heat Exchanger, *Renewable Energy*, Vol.112, pp.260-267.
11. Lee, C., Park, S., Choi, H. J., Lee, I. M., and Choi, H. (2016), Development of Energy Textile to Use Geothermal Energy in Tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.59, pp.105-113.
12. Lee, S., Han, T. H., Park, S., Hwang, C., and Choi, H. (2023), Thermal Performance Design and Analysis Method for Energy Cast-in-place Piles (E-CIPs) Installed in Diaphragm Walls, *Energy and Buildings*, 296, p.113372.
13. Lee, S., Park, S., Kang, M., and Choi, H. (2018), Field Experiments to Evaluate Thermal Performance of Energy Slabs with Different Installation Conditions, *Applied Sciences*, Vol.8, No.11, p.2214.
14. Lee, S., Park, S., Won, J., and Choi, H. (2021), Influential Factors on Thermal Performance of Energy Slabs Equipped with an Insulation Layer, *Renewable Energy*, Vol.174, pp.823-834.
15. Moon, C. E. and Choi, J. M. (2015), Heating Performance Characteristics of the Ground Source Heat Pump System with Energy-piles and Energy-slabs, *Energy*, Vol.81, pp.27-32.
16. Park, S., Lee, D., Lee, S., Chauchois, A., and Choi, H. (2017), Experimental and Numerical Analysis on Thermal Performance of Large-diameter Cast-in-place Energy Pile Constructed in Soft Ground, *Energy*, Vol.118, pp.297-311.
17. Park, S., Lee, S., Oh, K., Kim, D., and Choi, H. (2018), Engineering Chart for Thermal Performance of Cast-in-place Energy Pile Considering Thermal Resistance, *Applied Thermal Engineering*, Vol.130, pp.899-921.
18. Romagnoli, C., Zerbini, S., Lago, L., Richter, B., Simon, D., Domenichini, F., Elmi, C., and Ghirotti, M. (2003), Influence of Soil Consolidation and Thermal Expansion Effects on Height and Gravity Variations, *Journal of Geodynamics*, Vol.35, No.4-5, pp. 521-539.
19. Singh, S. B., Munjal, P., and Thammishetti, N. (2015), Role of Water/cement Ratio on Strength Development of Cement Mortar, *Journal of Building Engineering*, Vol.4, pp.94-100.
20. Waples, D. W. and Waples, J. S. (2004), A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids. Part 1: Minerals and Nonporous Rocks, *Natural Resources Research*, Vol.13, pp.97-122.
21. Zhao, J., Li, Y., and Wang, J. (2016), A Review on Heat Transfer Enhancement of Borehole Heat Exchanger, *Energy Procedia*, Vol.104, pp.413-418.

Received : January 31<sup>st</sup>, 2024

Revised : February 7<sup>th</sup>, 2024

Accepted : February 8<sup>th</sup>, 2024